

RS-2021-
IP121034

고기능성 축사바닥 발효깔짚 소재 개발 및 실용화

2024

농림식품기술기획평가원
농림축산식품부

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개() 발간등록번호(O)
2025축산현안대응산업화기술개발사업 2023년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004591-01

바이오매스 전소발전소 발생 바이오차를 이용한 고기능성 축사바닥 발효깔짚 소재 개발 및 실용화

2024.06.07.

주관연구기관 / 경상국립대학교
공동연구기관 / 흙사랑
공동연구기관 / (주)케이아그로

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “바이오매스 전소발전소 발생 바이오차를 이용한 고기능성 축사바닥 발효깔짚 소재 개발 및 실용화”(개발기간 : 2021. 04. ~ 2023. 12.)과제의 최종 보고서로 제출합니다.

답본일자 2024. 06. 07.

주관연구기관명 : 경상국립대학교 산학협력단장 (인)

공동연구기관명 : 흡사랑 강기갑 (인)

공동연구기관명 : ㈜케이아그로 김명훈

주관연구책임자 : 서동철

공동연구책임자 : 강기갑

공동연구책임자 : 김명훈

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

최종보고서							보안등급					
							일반[<input checked="" type="checkbox"/> , 보안[]]					
중앙행정기관명	농림축산식품부			사업명	사업명		2025축산현안대응 산업화기술개발					
전문기관명 (해당 시 작성)	농림식품기술기획평가원			내역사업명 (해당 시 작성)	내역사업명		가축생산효율성증진					
공고번호	농축2021-49호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)	총괄연구개발 식별번호		-					
				연구개발과제번호	연구개발과제번호		121034-3					
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0403	40%	LB0506	35%	LB0608	25%					
	농림식품과학기술분류	RA0202	40%	AB0203	35%	CA0105	25%					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	국문	-										
	영문	-										
연구개발과제명	국문	바이오매스 전소발전소 발생 바이오차를 이용한 고기능성 축사바닥 발효깔짚 소재 개발 및 실용화										
	영문	Development and commercialization of fermented litter material for high-functional livestock floors using biochar generated from biomass power plants										
주관연구개발기관	기관명	경상국립대학교 산학협력단		사업자등록번호								
	주소			법인등록번호								
연구책임자	성명	서동철		직위		부교수						
	연락처	직장전화			휴대전화							
		전자우편				국가연구자번호						
연구개발기간	전체	2021. 04. 01 - 2023. 12. 31(2년 9개월)										
	단계	1단계[]	2021. 04. 01 - 2022. 12. 31(1년 9개월)									
		2단계[<input checked="" type="checkbox"/>]	2023. 01. 01 - 2023. 12. 31(1년 개월)									
연구개발비 (단위: 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계		연구개발비의 지원금		
		현금	현물	지방자치단체	기타()		현금	현물	합계			
	총계	1,155,000	9,750	146,090			173,250	100,000	1,338,000		246,090	1,584,090
	1단계	1년차	315,000	4,750	42,750			47,250	27,000		367,000	69,750
	2년차	420,000	-	58,340			63,000	36,500	483,000	94,840	577,840	
	2단계	1년차	420,000	5,000	45,000			63,000	36,500	488,000	81,500	569,500
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고						
공동연구개발기관	홍사량	강기갑	이사			역할		공동 영농조합법인				
	㈜케이아그로	김명훈	대표이사			역할		공동 중소기업				
위탁연구개발기관						역할						
연구개발기관 외 기관	한국남동발전(주)	이재화	차장			역할		기타 공기업				
연구개발담당자 실무담당자	성명	이재훈		직위		박사과정						
	연락처	직장전화			휴대전화							
		전자우편				국가연구자번호						

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2024년 5월 10일

연구책임자: 경상국립대학교 서 동 철
 주관연구개발기관의 장: 경상국립대학교 산학협력단장
 공동연구개발기관의 장: 홍사량 강기갑
 공동연구개발기관의 장: ㈜케이아그로 김명훈

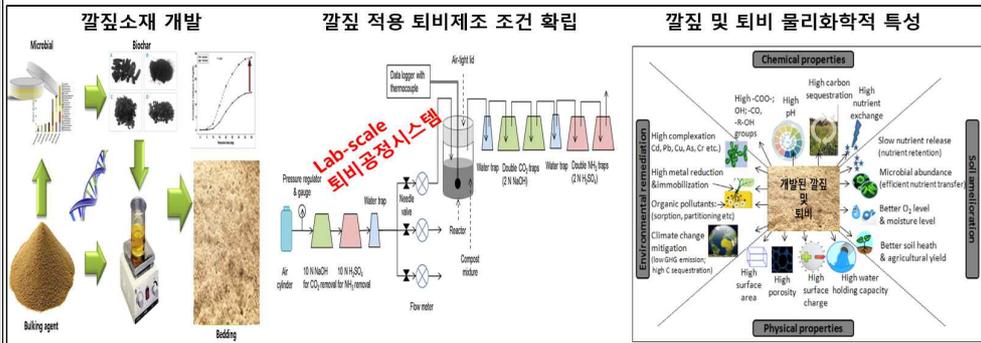


농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		2025축산현안대응산업화기술개발				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		-
내역사업명 (해당 시 작성)		가축생산효율성증진				연구개발과제번호		121034-3
기술 분류	국가과학기술 표준분류	LB0403	40%	LB0506	35%	LB0608	25%	
	농림식품 과학기술분류	RA0202	40%	AB0203	35%	CA0105	25%	
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		-						
연구개발과제명		바이오매스 전소발전소 발생 바이오차를 이용한 고기능성 축사바닥 발효 깔짚 소재 개발 및 실용화						
전체 연구개발기간		2021. 04. 01 - 2023. 12. 31(2년 9개월)						
총 연구개발비		총 1,592,430 천원 (정부지원연구개발비: 1,155,000 천원, 기관부담연구개발비: 437,430 천원)						
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[<input checked="" type="checkbox"/>] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준(3 단계) 종료시점 목표(9 단계)	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)								
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)								
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표	<div style="text-align: center;"> </div> <p>○ 본 연구는 현재 우사와 계사에 사용되는 바닥 깔짚의 문제점을 해결하고, 가축분 퇴비 부숙도 검사가 의무화됨에 따라 친환경적인 바닥 깔짚 소재를 개발하여 축사를 효율적으로 관리하기 위해,</p> <p>(1) 가축분뇨를 자가처리하는 농가에 필요한 한우 및 가금용 친환경 바이오차 발효 깔짚 소재를 개발</p> <p>(2) 퇴비사와 연계하여 퇴비의 부숙도를 안정적으로 관리하는 기술을 실용화하여 실제 축산농가에 적용하고자 함.</p>						

[1차년도] 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 제조 원천기술 개발



- 축사바닥 깔짚 소재 제조 원천기술 개발 (경상국립대)
- 축사바닥 깔짚 소재 적용 부숙미생물 배양 및 적용기술 개발 (휴사랑)
- 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 및 원료 다양화 방안 연구 (케이아그로)

[2차년도] 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계 기술 개발



전체 내용

- 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계기술 핵심기술 개발 (경상국립대)
- 축사바닥 깔짚 우사 및 계사용 깔짚 소재 생산 및 제조공정 개발 (휴사랑)
- 축사바닥 깔짚 소재의 우사 및 계사 실증포 운영 (케이아그로)

[3차년도] 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재의 실용화 및 산업화



- 개발된 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 효과 검증 (경상국립대)
- 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 대량 생산공정 및 표준화 기술개발 (휴사랑)
- 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 실용화 및 산업화 (케이아그로)

1 단 계	목표	<ol style="list-style-type: none"> 1. 축사바닥 깔짚 소재 제조 원천기술개발 2. 축사바닥 깔짚 소재 적용 부숙미생물 배양 및 적용축사바닥 깔짚 소재 운영실태 및 원료 다양화 방안 연구 3. 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 및 원료 다양화 방안 연구 4. 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계를 위한 핵심기술 개발 5. 우사 및 계사 깔짚 소재 제조공정 및 시제품 개발 6. 축사바닥 깔짚의 우사 및 계사 실증포 운영
	내용	<p>[주관연구기관-경상국립대학교]</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 축사바닥 깔짚 소재 제조 원천기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 다양한 수분조절재 및 보조제들의 이화학적 특성 평가 - 축사바닥 깔짚 소재의 최적화 - 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 기술 확립 ■ 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계를 위한 핵심기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 계분뇨 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립 - 개발된 깔짚 소재 적용 축사 내 부숙화 단계 검증 - 가축분뇨 혼합된 깔짚의 축사에서 퇴비사로 연계방안 확립 - 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 환경위해성 평가 - 축사바닥 깔짚 소재 적용 친환경 가축분뇨 퇴비화 시스템 개발 <p>[공동연구기관1-휴사랑]</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 축사바닥 깔짚 소재 적용 부숙미생물 배양 및 적용기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 우사 및 계사 깔짚 소재 제조공정 개발 - 혼합미생물 첨가 우사 및 계사 깔짚 소재 시제품 개발 ■ 우사 및 계사 깔짚 소재 제조공정 및 시제품 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 우사 및 계사 깔짚 소재 제조공정 개발 - 혼합미생물 첨가 우사 및 계사 깔짚 소재 시제품 개발 <p>[공동연구기관2-케이아그로]</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 및 원료 다양화 방안 연구 <ul style="list-style-type: none"> - 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 조사 - 축사바닥 깔짚 소재 문제점 및 개선방안 도출 - 축사바닥 깔짚 소재 원료 공급방법 및 다양화 방안 연구 ■ 축사바닥 깔짚의 우사 및 계사 실증포 운영 <ul style="list-style-type: none"> - 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 우사 적용 실증포 운영 - 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 계사 적용 실증포 운영 - 사용된 축사바닥 깔짚으로 제조된 퇴비의 농작물별 실증시험포 운영
2 단 계	목표	<ol style="list-style-type: none"> 1. 개발된 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 효과 검증 2. 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 대량 생산공정 및 표준화 기술개발 3. 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 실용화 및 산업화
	내용	<p>[주관연구기관-경상국립대학교]</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 개발된 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 효과 검증 <ul style="list-style-type: none"> - 축사바닥 깔짚 소재 특성 및 안전성 시험 - 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템 효율 평가 - 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 비해시험 - 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 작물재배 효과시험 <p>[공동연구기관1-휴사랑]</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 대량 생산공정 및 표준화 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 대량 생산공정 - 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 표준화공정 개발 - 3톤 용량의 축사바닥 깔짚 소재 생산시스템 운영 <p>[공동연구기관2-케이아그로]</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 실용화 및 산업화 <ul style="list-style-type: none"> - 개발된 축사바닥 깔짚 소재 신시장 구축 - 개발된 축사바닥 깔짚 신소재의 유통전략 구축 - 사용된 축사바닥 깔짚으로 제조된 퇴비의 유통전략 구축

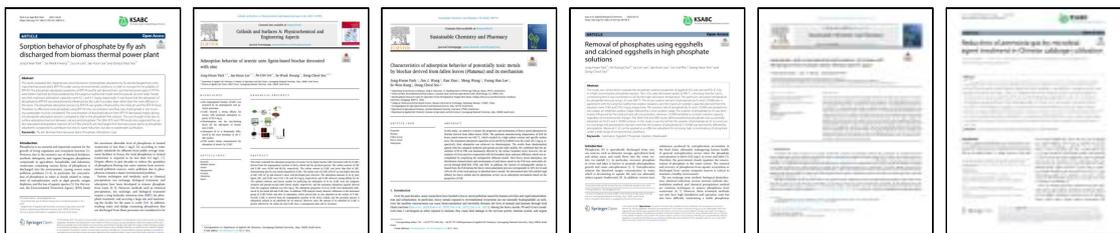
■ 정성적 연구성과

- 탄소중립을 실현하면서 가축 사육두수 증가로 인한 축산분뇨와 축사 악취 등 환경문제를 해결하기 위해 고기능성 바이오차 깔짚을 개발하여 실용화함
- (논문) 수분흡수속도를 이용한 깔짚 사용기간 국내최초 규명, 바이오차 활용 고기능성 축사바닥 깔짚의 악취저감 효과, 깔짚사용기간 연장, 부숙기간 단축 효과 규명 (전체 SCIE 6건, 비SCIE 4건; 2023년 SCI 2건(JCR 상위 30% 1건), 비 SCI 2건)
 - 개발된 바이오차 깔짚은 기존 왕겨대비 깔짚사용기간을 50% 연장, 부숙기간을 27% 단축, 악취제거효율을 55% 향상시키는데 성공
- (특허) ‘바이오차, 피트모스, 미생물을 활용한 축사깔짚의 제조 방법’ 등 특허 등록 5건, 특허 출원 8건 완료 (2023년 특허 등록 4건, 특허 출원 3건)
- (기술이전) ‘바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진 기술’과 ‘바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법 및 활용 기술’ 기술이전 2건 실시
- (사업화) 깔짚 산업화를 위해 7개 실증포를 운영하여 현장검증을 완료하고 생산준비완료
 - 본 기술을 산업화를 위해 경남 창녕군에 3000평 부지에 깔짚 생산공장 신설
 - 2종의 깔짚제품(블랙랜드 바이오차, 토턴 바이오차)을 성공적으로 개발함
- (탄소중립효과) 바이오차 20% 깔짚 보급시 최대 130만톤 CO₂ 감축가능(연간 깔짚사용량 300만톤 기준, IPCC의 고온 Biochar 1톤 온실가스 감축량= 2.168톤CO₂; 건조중량기준)

■ 정량적 연구성과

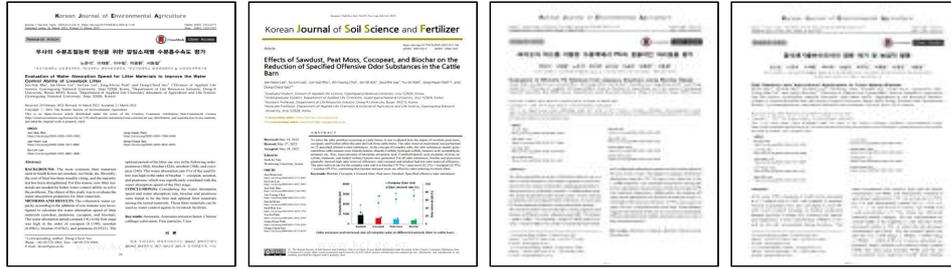
○ SCIE 논문 6건

- Characteristics of adsorption behavior of potentially toxic metals by biochar derived from fallen leaves (Platanus) and its mechanism(Sustainable Chemistry and Pharmacy, IF : 5.464, JCR 상위 30%)
- Adsorption behavior of arsenic onto lignin-based biochar decorated with zinc(Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, IF : 5.518)
- Sorption behavior of phosphate by fly ash discharged from biomass thermal power plant(Applied Biological Chemistry, IF : 3.2)
- Removal of phosphates using eggshells and calcined eggshells in high phosphate solutions(Applied Biological Chemistry, IF : 3.2)
- Agronomic and environmental performance of bottom ash discharged from biomass-based thermal power plant(Sustainable Chemistry and Pharmacy, IF : 6.0)
- Reduction of ammonia gas by microbial agent treatment in Chinese cabbage cultivation(Applied Biological Chemistry, IF : 3.2)



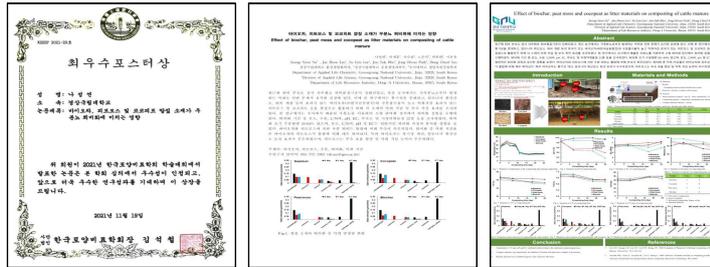
○ 비SCIE 논문 4건

- 우사의 수분조절능력 향상을 위한 깔짚소재별 수분흡수속도 평가 (Korean Journal of Environmental Agriculture)
- Effects of Sawdust, Peat Moss, Cocopeat, and Biochar on the Reduction of Specified Offensive Odor Substances in the Cattle Barn (Korean Journal of Soil Science and Fertilizer)
- 바이오차 비드를 이용한 수용액에서 Pb의 효율적인 처리효율 평가(Korean Journal of Environmental Agriculture)
- 음식폐기물바이오차의 염분 제거 및 농업적 활용(Korean Journal of Environmental Agriculture)



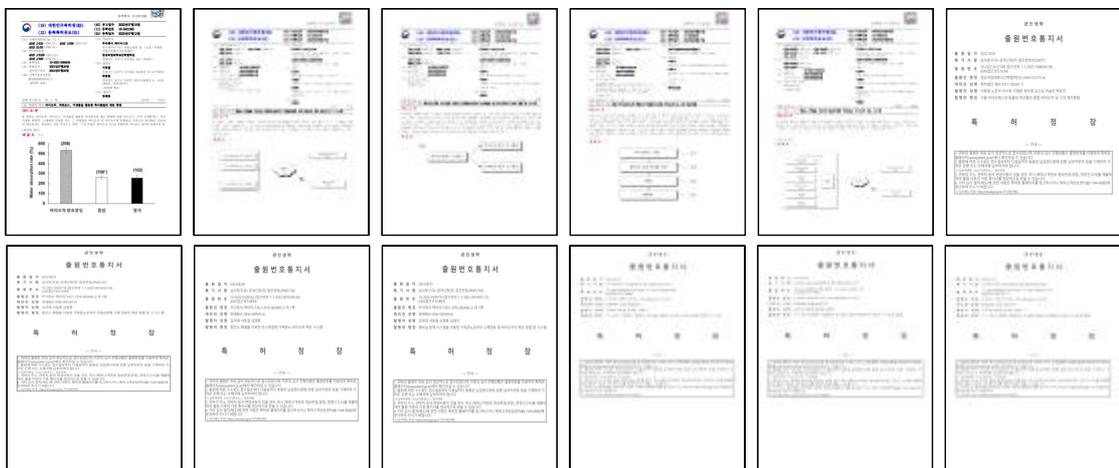
○ 국제 학술대회 13건, 국내 학술대회 7건

- 최우수 포스터상 (2021 한국토양비료학회): 가축분뇨 축사바닥 깔짚소재 개발



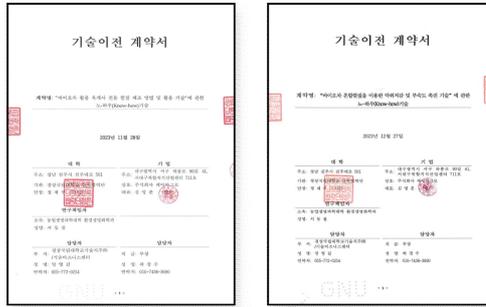
○ 특허 등록 5건, 출원 8건

- 바이오차, 피트모스, 미생물을 활용한 축사깔짚의 제조 방법 (출원번호 : 10-2021-0094915) (등록번호 : 10-2421396)
- 발전소 폐열을 이용한 탄소중립형 가축분뇨 바이오차 제조 시스템(출원번호 : 10-2022-0109162) (등록번호 : 10-2588115)
- 발전소 폐열을 이용한 가축분뇨로부터 자원순환형 고체 연료의 제조 방법 및 그 시스템(출원번호 : 10-2022-0109778) (등록번호 : 10-2521745)
- 폐비닐 분해 시스템을 이용한 가축분뇨로부터 고체연료 및 바이오차의 제조 방법 및 시스템(출원번호 : 10-2022-0109779) (등록번호 : 10-2521749)
- 식물 바이오매스와 동물성 부산물의 혼합 바이오차 및 그의 제조방법(출원번호 : 10-2022-0127148) (등록번호 : 10-2569321)
- 수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 유기탄소비료의 제조 방법 및 시스템(출원번호 : 10-2023-0046944)
- 수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 탄질비료의 제조 시스템 및 방법(출원번호 : 10-2023-0046945)
- 수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 고체연료의 제조 시스템 및 방법(출원번호 : 10-2023-0046946)



○ 기술이전 2건(50,000천원)

- 바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법 및 활용 기술(2023.11.28.): 25,000천원
- 바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진 기술(2023.12.27.): 25,000천원



○ 제품화 2건

- 계사용 축사바닥 깔짚: 토턴 바이오차
- 우사용 축사바닥 깔짚: 블랙랜드 바이오차
- 제품화 진행 기업: (주)케이아그로(창녕공장 건설 후 생산), 신성미네랄(5월 출시), 이수농산(2024년 하반기 생산)



○ 고용창출 1명

○ 인력양성(석사 3명, 학사 7명)

○ 홍보 및 기타 성과

- 경상국립대학교 바이오차 연구센터 설립(2023.01.04.)
- (사)코리아 바이오차 협회 설립(2023.02.13.)
- 2023, 2024 탄소중립 바이오차 포럼 개최(여수, 부산)
- 바이오차 재직자과정 개설(2024.02.01.)
- 바이오차 깔짚 홍보 (18건)

[바이오차 연구센터 설립] [국내최초 바이오차 협회설립] [탄소중립 바이오차 포럼 개최] [바이오차 깔짚 홍보]



연구개발
성과
활용계획
및
기대효과

1. 연구개발성과의 활용계획

- 가축분뇨의 고체연료, 바이오차 등의 자원화 개념을 바이오차 깔짚으로 전환하여 탄소 중립과 깔짚문제 동시에 해결
- 깔짚과 퇴비사 연계가능한 고기능성 깔짚을 상품화하여 보급 및 확산
- 가축분뇨의 효율적/안정적인 자원화 및 탄소격리가 가능한 고품질퇴비 생산에 활용
- 축산농가가 안고 있는 가축분뇨 퇴비화 관련 현장 애로사항을 해결
- 축사의 악취저감, 깔짚사용기간 연장, 부숙도 촉진으로 환경오염 최소화에 활용

2. 연구개발성과의 기대효과

○ 과학·기술적 측면

- 국내 축산환경에 적합한 축사깔짚과 퇴비사를 연계하여 **최적의 바이오차 깔짚을 개발하고 악취저감, 깔짚사용기간 연장, 부숙화 촉진 등의 원천기술 확보**
- 축사에서 발생하는 악취에 대응하기 위한 **깔짚소재별 악취저감능력을 규명하여 22종 지정악취 종류별, 복합악취에 깔짚 원천기술 확보**
- 고기능성 바이오차 깔짚 개발을 통한 유기성 폐자원의 업사이클링 신기술 확보
- 고기능성 바이오차 깔짚으로 생산된 고품질 가축분뇨 퇴비 제조기술 확보

○ 경제·산업적 측면

- **고기능성 바이오차 깔짚 소재 및 고품질 바이오차 퇴비 생산으로 고부가가치 창출**
- 특허 및 상표 등의 지식재산권 확보와 기술사업화로 수입창출
- 바이오차 깔짚의 퇴비시 부숙시간 단축으로 인한 축산농가 현안문제 해결
- **고기능성 바이오차 깔짚과 고품질 바이오차 가축분뇨 퇴비**로의 자원화 기술개발을 통한 **신 산업시장 개척 기반 마련**

연구개발성과의 비공개여부 및 사유													
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종		
								생명 정보	생물 자원		정보	실물	
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호				
국문핵심어 (5개 이내)	바이오차 깔짚		축사바닥		바이오차		악취저감		퇴비화 촉진				
영문핵심어 (5개 이내)	Biochar litter		Livestock floors		Biochar		Odor reduction		Promote composting				

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	20
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	28
가. 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 제조 원천기술 개발	28
1) 축사바닥 깔짚 소재 제조 원천기술 개발	28
가) 다양한 수분조절재 및 보조제들의 이화학적 특성 평가	28
(1) 공시재료	28
(가) 수분조절재	28
(나) BPP-BA	28
(다) 미생물	29
(2) 이화학적 특성 평가	29
(가) 화학적 특성	29
(나) 물리적 특성	29
(다) 구조적 특성	29
나) 축사바닥 깔짚 소재의 최적화	30
(1) 깔짚 소재로서 최적의 수분조절재 선정	30
(2) 수분조절재 및 보조제들의 성형조건에 따른 최적화	30
(가) 수분조절재 크기	30
(나) BPP-BA 적용비율 및 크기	31
(다) 미생물 제형	31
(3) 수분조절재 및 보조제들의 최적 혼합비율 결정	32
(가) 수분조절재:BPP-BA:미생물제 혼합비율	32
(나) 최적비율로 혼합된 깔짚 소재의 이화학적 분석 및 안전성 평가	32
다) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 기술 확립	33
(1) 가축분뇨 (우분뇨)	33
(2) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화를 위한 소형 퇴비화 장치 설계 및 제작	34
(3) 최적화된 깔짚 소재와 우분뇨 혼합비율 선정	36
(4) 최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 송풍조건 확립	36
(5) 최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 최적 온도 선정	36
(6) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립	36
(7) 각 조건에서 생산된 우분 퇴비의 품질특성 및 안정성 평가	36
(가) 제조된 퇴비의 품질특성	36
(나) 부숙도 판정	36
(다) 제조된 퇴비의 안정성	37
2) 축사바닥 깔짚 소재 적용 부숙미생물 배양 및 적용기술 개발	37
가) 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물 배양조건 확립	37
(1) 공시미생물	37
(2) 미생물 배양	37
(3) 실험조건	38
(가) 미생물 종류별 질소원에 의한 효과	38
(나) 미생물 종류별 탄소원에 의한 효과	38

(다) 미생물 종류별 무기성분에 의한 효과	38
(라) 미생물 종류별 배양온도에 의한 효과	38
(마) 미생물 종류별 pH에 의한 효과	38
(바) 미생물 종류별 교반속도에 의한 효과	39
(사) 미생물 종류별 배양시간에 의한 영향	39
(아) 미생물 종류별 염분농도에 의한 효과	39
나) 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물 대량배양 공정개발	39
(1) 살균 및 멸균 배양기 제작 및 시운전	39
(2) 미생물 종류별 물리·화학적 배양조건 검토	39
(3) 최적 배양조건 도출	39
다) 혼합미생물 배양조건 및 공정 개발	40
(1) 미생물 혼합비율별 배양 최적 공정 확립	40
(2) Seed 액상배양 공정 확립	40
(3) 고상발효 공정 확립	40
(4) 고상흡착 공정 확립	40
(5) 원료의 부형제 확립	41
(6) 깔짚 적용 미생물 시제품의 pilot test	41
라) 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 생산공정 개발	41
(1) 탄소/질소 제어율 조절 기술 확립	41
(2) 질소/인 제어율 조절 기술 확립	41
(3) 탄소/질소 제어공정의 운전기술 최종확립	41
(4) 개발된 공정의 운전비용 도출	41
(5) 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 배양공정의 연계 운전방법 확립	41
3) 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 및 원료 다양화 방안 연구	42
가) 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 조사	42
나) 축사바닥 깔짚 소재 문제점 및 개선방안 도출	42
다) 축사바닥 깔짚 소재 원료 수급 방법 및 다양화 방안 연구	42
나. 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발	43
1) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계를 위한 핵심기술 개발	43
가) 계사 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립	43
(1) 공시재료	43
(가) 수분조절재	43
(나) 바이오차	43
(다) 미생물	43
(라) 계분뇨	44
(2) 계사 전용 깔짚 소재 최적 수분조절재 및 혼합비율 선정	45
(가) 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험	45
(나) 혼합 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험	46
(3) 최적화된 깔짚 소재의 계분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립	46
(4) 계사 전용 깔짚 소재 최적 미생물제 선정	46
(가) 단일 및 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링	46
(나) 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링	47
(다) 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링	47

(5) 각 조건에서 생산된 계분뇨 퇴비의 품질특성 및 안정성 평가	48
(가) 계분뇨 퇴비의 품질 특성	48
(나) 계분뇨 퇴비의 안정성 평가	48
(다) 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 계사 내 악취 발생 특성 평가	49
나) 우사 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립	49
(1) 공시재료	49
(가) 수분조절재	49
(나) 바이오차	49
(다) 우분뇨	49
(2) 우사 전용 깔짚 소재 최적 수분조절재 및 혼합비율 선정	50
(가) 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 시험	50
(나) 혼합 깔짚의 수분흡수속도 시험	50
(3) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립	50
(4) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 악취 저감 효율 평가	50
(가) 단일 소재 깔짚의 악취 저감 효율 평가	50
(나) 혼합 깔짚의 악취 저감 효율 평가	51
다) 개발된 깔짚 소재 적용 축사내 부숙화 단계 검증(1단계 퇴비화)	51
(1) 조건 실험이 가능한 축산농가 선정	51
(2) 개발된 깔짚을 적용한 후 입식 및 사육(우사 내 건조)	51
(3) 개발된 깔짚 적용 축사 모니터링	51
라) 가축분뇨 혼합된 깔짚의 축사와 퇴비사 연계방안 확립	51
(1) 상기 선행연구 결과를 적용하여 축사에서 퇴비사로 가축분뇨 혼합된 깔짚의 이동 시기 결정	51
(2) 축사에서 퇴비사 적용시 최적환경 조건 구축	51
(가) 과도한 수분누적시 추가적인 수분조절재 공급	51
(나) 추가적인 산소공급 필요시 송풍 라인 구축	51
(3) 고품질 퇴비 생산을 위한 퇴비사내 퇴비더미 높이 결정	52
마) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 환경위해성 평가(2단계 퇴비화)	52
(1) 시험처리 : 일반적 깔짚 소재 적용 및 본 연구에서 개발된 깔짚 소재 적용	52
(2) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 용출성분 및 침출수 평가	52
(가) 부숙시기별 용출 성분 및 침출수 분석	52
(3) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 배출되는 온실가스 분석	52
(가) 부숙시기별 온실가스 배출특성	52
(4) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 배출되는 악취성분 분석	52
(가) 부숙시기별 악취성분 배출 특성	52
(5) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 질소 손실을 평가	52
(가) 부숙시기별 질소 함량 및 중량 분석	52
바) 축사바닥 깔짚 소재 적용 친환경 가축분뇨 퇴비화 시스템 개발	52
(1) 상기 2-나-1) 항 중 기준을 초과하는 물질에 대한 저감 방안 수립	52
(2) 상기 2-나-1) 항 중 기준을 초과하는 물질을 저감하기 위한 시스템 변경	52
(3) 고기능성 및 고품질 친환경 퇴비생산을 위한 깔짚 소재 보완 및 퇴비화 시스템 개발	53
2) 축사바닥 깔짚 우사 및 계사용 깔짚 소재 생산, 제조공정 개발 및 표준화 기술 개발	53
가) 우사 및 계사 깔짚 소재 제조공정 및 대량생산 공정 개발	53

(1) 깔짚 소재의 이화학적 특성분석	53
(2) 미생물 종류별 미생물+쌀겨 공정 확립	53
(3) 우사 및 계사 깔짚 소재 최적 혼합비율 선정	53
(4) 우사 및 계사 깔짚 이용기술 개발 (사용량, 교체 시기 등)	54
(5) 우사 및 계사 깔짚 이용기술을 고려한 제조공정 최적화 및 표준화 공정 개발	55
나) 혼합미생물 첨가 우사 및 계사 깔짚 소재 시제품 개발	56
(1) 미생물 (쌀겨) + 왕겨 or 톱밥 발효깔개 개발	56
(가) 미생물 (쌀겨) + 왕겨 or 톱밥 발효깔개 시제품 생산	56
(나) 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화	56
(2) 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효깔개 시제품 개발	56
(가) 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효깔개 시제품 생산	56
(나) 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화	56
(3) 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효깔개 시제품 개발	56
(가) 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효깔개 시제품 생산	56
(나) 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화	57
(4) 미생물(쌀겨) + 피트 발효깔개 시제품 개발	57
(가) 미생물(쌀겨) + 피트 발효깔개 시제품 생산	57
(나) 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화	57
다) 3톤 용량의 축사바닥 깔짚 소재 생산시스템 운영	57
(1) 우사 및 계사 맞춤형 발효깔개 생산시스템 확립 및 제품생산	57
(가) 품질관리방법 확립	57
(나) 경제성 분석	57
3) 축사바닥 깔짚 소재의 우사 및 계사 실증포 운영	57
가) 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 우사 적용 실증포 운영	57
나) 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 계사 적용 실증포 운영	57
다) 사용된 축사바닥 깔짚으로 제조된 퇴비의 농작물별 실증시험포 운영	58
4) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발	58
가) 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개요	58
나) 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 평가	58
(1) 왕겨 깔짚 사용 전과정 평가	58
(2) 혼합 깔짚 사용 전과정 평가	59
(3) 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 평가 적요	59
다. 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재의 실용화 및 산업화	60
1) 개발된 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 효과 검증	60
가) 축사바닥 깔짚 소재 특성 및 안정성 시험	60
(1) 최적시스템에서 제조된 깔짚 소재의 특성	60
(가) 최적시스템에서 제조된 깔짚의 이화학적 특성	60
(2) 개발된 깔짚 소재의 안정성 평가	60
(가) 육안관찰	60
(나) 깔짚 소재 자체의 안정성	60
나) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템 효율 평가	60
(1) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템에서 퇴비생산 수율 평가	60
(2) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템에서 생산된 퇴비의 품질특성	60

(3) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 위해 물질 저감 효율 평가	60
다) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 비해시험	61
(1) 우분 퇴비의 비해시험	61
(가) 톱밥 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험	61
(나) 혼합 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험	63
(2) 계분 퇴비의 비해시험	63
(가) 왕겨 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험	63
(나) 혼합 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험	63
라) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 현장 재배 시험	63
(1) 일반 노지에서 작물 재배시험	63
(가) 재배된 작물수량 및 무기성분 조사	64
(나) 토양 특성 변화	64
(다) 온실가스 발생량	64
(라) 토양 내 미생물상 변화	65
(2) 양분 결핍토양에서 작물 재배시험	66
(가) 재배된 작물수량 및 무기성분 조사	66
(나) 토양 특성 변화	66
(다) 온실가스 발생량	66
(라) 토양 내 미생물상 변화	66
마) 깔짚 실증 실험	68
(1) 1차 실증 실험	68
(2) 2차 실증 실험	69
(3) 3차 실증 실험	69
3) 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 실용화 및 산업화	70
가) 개발된 축사바닥 깔짚 소재 신시장 구축	70
(1) 신소재 축산 깔짚 제조공장 구축	70
(2) 개발된 깔짚의 재활용환경성 평가	70
(가) 사업의 배경 및 목적	70
① 배경 및 목적	70
② 재활용 기대효과	70
(나) 대상폐기물 배출사업장 현황	70
① 일반현황	70
(다) 재활용시설 운영 및 품질관리계획	70
① 재활용제품의 성능확인	70
(라) 재활용환경성평가 현장조사 관련 재활용공정 시연 계획	70
① 시연계획	70
② 대체시설 현황	70
③ 재활용제품 납품업체 시연계획	70
(3) 농민단체와 공동사업 추진	70
(4) 기업형 유통망 공략((주)하림)	70
나) 개발된 축사바닥 깔짚 신소재의 유통 및 사업화 전략 구축	70

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	71
가. 정성적 연구개발성과	71
1) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 제조 원천기술 개발	71
가) 축사바닥 깔짚 소재 제조 원천기술 개발	71
(1) 다양한 수분조절재 및 보조제들의 이화학적 특성 평가	71
(가) 수분조절재	71
(나) BPP-BA	76
(2) 축사바닥 깔짚 소재의 최적화	79
(가) 깔짚 소재로서 최적의 수분조절재 선정	79
(나) 수분조절재 및 보조제들의 성형조건에 따른 최적화	87
① 수분조절재 크기	87
② BPP-BA 적용비율 및 크기	89
③ 미생물 제형	95
(다) 수분조절재 및 보조제들의 최적 혼합비율 결정	100
① 수분조절재:BPP-BA:미생물제 혼합비율(수분조절재 및 BPP-BA 혼합비율)	100
② 수분조절재:BPP-BA:미생물제 혼합비율(미생물제 혼합비율)	102
③ 최적비율로 혼합된 깔짚 소재의 이화학적 분석 및 안전성 평가	106
(3) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 기술 확립	107
(가) 최적화된 깔짚 소재와 우분뇨 혼합비율 선정	107
(나) 최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 송풍조건 확립	115
(다) 최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 최적 온도 선정	118
(라) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립	120
나) 축사바닥 깔짚 소재 적용 부숙미생물 배양 및 적용기술 개발	121
(1) 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물 배양조건 확립	121
(가) 미생물 종류별 질소원에 의한 효과	121
(나) 미생물 종류별 탄소원에 의한 효과	122
(다) 미생물 종류별 무기성분에 의한 효과	123
(라) 미생물 종류별 배양온도에 의한 효과	124
(마) 미생물 종류별 pH에 의한 효과	125
(바) 미생물 종류별 교반속도에 의한 효과	126
(사) 미생물 종류별 배양시간에 의한 영향	127
(아) 미생물 종류별 염분농도에 의한 효과	128
(2) 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물 대량배양 공정개발	129
(가) 살균 및 멸균 배양기 제작 및 시운전	129
(나) 미생물 종류별 물리·화학적 배양조건 검토	130
(다) 최적 배양조건 도출	131
(3) 혼합미생물 배양조건 및 공정 개발	131
(가) 미생물 혼합비율별 배양 최적 공정 확립	131
(나) Seed 액상배양 공정 확립	132
(다) 고상발효 공정 확립	133
(라) 고상흡착 공정 확립	135
(마) 원료의 부형제 확립	136
(바) 깔짚 적용 미생물 시제품의 pilot test	136

(4) 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 생산공정 개발 -----	136
(가) 탄소/질소 제어율 조절 기술 확립-----	136
(나) 질소/인 제어율 조절 기술 확립-----	137
(다) 탄소/질소 제어공정의 운전기술 최종확립-----	138
(라) 개발된 공정의 운전비용 도출-----	139
(마) 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 배양공정의 연계 운전방법 확립-----	139
다) 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 및 원료 다양화 방안 연구 -----	140
(1) 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 조사-----	140
(2) 축사바닥 깔짚 소재 문제점 및 개선방안 도출-----	143
(3) 축사바닥 깔짚 소재 원료 수급 방법 및 다양화 방안 연구-----	144
2) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발 -----	146
가) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계를 위한 핵심기술 개발 -----	146
(1) 계사 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립-----	146
(가) 계사 전용 깔짚 소재 최적 수분조절재 및 혼합비율 선정-----	146
① 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험-----	146
② 혼합 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험-----	150
(나) 최적화된 깔짚 소재의 계분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립-----	154
(다) 계사 전용 깔짚 소재 최적 미생물제 선정-----	154
① 단일 및 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링-----	154
② 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링-----	157
③ 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링-----	159
(라) 각 조건에서 생산된 계분뇨 퇴비의 품질특성 및 안정성 평가-----	162
① 계분뇨 퇴비의 품질 특성-----	162
② 계분뇨 퇴비의 안정성 평가-----	172
③ 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 계사 내 악취 발생 특성 평가-----	192
(2) 우사 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립-----	220
(가) 우사 전용 깔짚 소재 최적 수분조절재 및 혼합비율 선정-----	220
① 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 시험-----	220
② 혼합 깔짚의 수분흡수속도 시험-----	223
(나) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립-----	225
(다) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 악취 저감 효율 평가-----	225
① 단일 소재 깔짚의 악취 저감 효율 평가-----	225
② 혼합 깔짚의 악취 저감 효율 평가-----	230
(3) 개발된 깔짚 소재 적용 축사내 부숙화 단계 검증(1단계 퇴비화)-----	232
(가) 조건 실험이 가능한 축산농가 선정-----	232
(나) 개발된 깔짚을 적용한 후 입식 및 사육-----	244
(다) 개발된 깔짚 적용 축사 모니터링-----	250
(4) 가축분뇨 혼합된 깔짚의 축사와 퇴비사 연계방안 확립-----	254
(가) 상기 선행연구 결과를 적용하여 축사에서 퇴비사로 가축분뇨 혼합된 깔짚의 이동 시기 결정-----	254
(나) 축사에서 퇴비사 적용시 최적환경 조건 구축-----	254
① 과도한 수분누적시 추가적인 수분조절재 공급-----	254
② 추가적인 산소공급 필요시 송풍 라인 구축-----	254
(다) 고품질 퇴비 생산을 위한 퇴비사내 퇴비더미 높이 결정-----	254

(5) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 환경위해성 평가(2단계 퇴비화)	255
(가) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 용출성분 및 침출수 평가	255
① 부숙시기별 용출 성분 및 침출수 분석	255
(나) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 배출되는 온실가스 분석	256
① 부숙시기별 온실가스 배출특성	256
(다) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 배출되는 악취성분 분석	257
① 부숙시기별 악취성분 배출 특성	257
(라) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 질소 손실률 평가	259
① 부숙시기별 질소 함량 및 중량 분석	259
(6) 축사바닥 깔짚 소재 적용 친환경 가축분뇨 퇴비화 시스템 개발	259
(가) 상기 3-가-2)-가) 항 중 기준을 초과하는 물질에 대한 저감 방안 수립	259
(나) 상기 3-가-2)-가) 항 중 기준을 초과하는 물질을 저감하기 위한 시스템 변경	259
(다) 고기능성 및 고품질 친환경 퇴비생산을 위한 깔짚 소재 보완 및 퇴비화 시스템 개발	259
나) 축사바닥 깔짚 우사 및 계사용 깔짚 소재 생산, 제조공정 개발 및 표준화 기술 개발	260
(1) 우사 및 계사 깔짚 소재 제조공정 및 대량생산 공정 개발	260
(가) 미생물 종류별 미생물+쌀겨 공정 확립	260
(나) 우사 및 계사 깔짚 소재 최적 혼합비율 선정	263
(다) 우사 및 계사 깔짚 이용기술 개발 (사용량, 교체 시기 등)	268
① 우사의 깔짚 이용기술 개발	268
② 계사의 깔짚 이용기술 개발	269
(라) 우사 및 계사 깔짚 이용기술을 고려한 제조공정 최적화 및 표준화 공정 개발	270
① 우사의 깔짚 제조공정 최적화 및 표준화 공정 개발	271
② 계사의 깔짚 제조공정 최적화 및 표준화 공정 개발	272
(2) 혼합미생물 첨가 우사 및 계사 깔짚 소재 시제품 개발	273
(가) 미생물 (쌀겨) + 왕겨 or 톱밥 발효깔개 개발	273
① 미생물 (쌀겨) + 왕겨 or 톱밥 발효깔개 시제품 생산	273
② 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화	273
(나) 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효깔개 시제품 개발	274
① 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효깔개 시제품 생산	274
② 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화	274
(다) 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효깔개 시제품 개발	275
① 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효깔개 시제품 생산	275
② 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화	275
(라) 미생물(쌀겨) + 피트 발효깔개 시제품 개발	276
① 미생물(쌀겨) + 피트 발효깔개 시제품 생산	276
② 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화	276
(3) 3톤 용량의 축사바닥 깔짚 소재 생산시스템 운영	277
(가) 우사 및 계사 맞춤형 발효깔개 생산시스템 확립 및 제품생산	277
① 품질관리방법 확립	277
② 경제성 분석	277
다) 축사바닥 깔짚 소재의 우사 및 계사 실증포 운영	279
(1) 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 우사 적용 실증포 운영	280
(2) 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 계사 적용 실증포 운영	281

(3) 사용된 축사바닥 깔짚으로 제조된 퇴비의 농작물별 실증시험포 운영	282
라) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발	283
(1) 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개요	283
(2) 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 평가	283
(가) 왕겨 깔짚 사용 전과정 평가	283
(나) 혼합 깔짚 사용 전과정 평가	284
(다) 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 평가 적요	286
3) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재의 실용화 및 산업화	296
가) 개발된 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 효과 검증	296
(1) 축사바닥 깔짚 소재 특성 및 안정성 시험	296
(가) 최적시스템에서 제조된 깔짚 소재의 특성	296
① 최적시스템에서 제조된 깔짚의 이화학적 특성	296
(나) 개발된 깔짚 소재의 안정성 평가	297
① 육안관찰	297
② 깔짚 소재 자체의 안정성	298
(2) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템 효율 평가	299
(가) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템에서 퇴비생산 수율 평가	299
(나) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템에서 생산된 퇴비의 품질특성	299
(다) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 위해 물질 저감 효율 평가	299
(3) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 비해시험	300
(가) 우분 퇴비의 비해시험	300
① 톱밥 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험	300
② 혼합 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험	307
(나) 계분 퇴비의 비해시험	314
① 왕겨 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험	314
② 혼합 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험	321
(4) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 현장 재배 시험	328
(가) 일반 노지에서 작물 재배시험	328
① 재배된 작물수량 및 무기성분 조사	328
② 토양 특성 변화	342
③ 온실가스 발생량	347
④ 토양 내 미생물상 변화	347
(나) 양분 결핍토양에서 작물 재배시험	348
① 재배된 작물수량 및 무기성분 조사	348
② 토양 특성 변화	351
③ 온실가스 발생량	352
④ 토양 내 미생물상 변화	353
(5) 깔짚 실증 실험	354
(가) 1차 실증 실험	354
(나) 2차 실증 실험	362
(다) 3차 실증 실험	368
다) 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 실용화 및 산업화	373
(1) 개발된 축사바닥 깔짚 소재 신시장 구축	373

(가) 신소재 축산 깔짚 제조공장 구축	373
(나) 개발된 깔짚의 재활용환경성 평가	375
① 사업의 배경 및 목적	375
㉠ 배경 및 목적	375
㉡ 재활용 기대효과	387
② 대상폐기물 배출사업장 현황	394
㉠ 일반현황	394
③ 재활용시설 운영 및 품질관리계획	406
㉠ 재활용제품의 성능확인	406
④ 재활용환경성평가 현장조사 관련 재활용공정 시연 계획	406
㉠ 시연계획	406
㉡ 대체시설 현황	406
㉢ 재활용제품 납품업체 시연계획	407
(다) 농민단체와 공동사업 추진	407
(라) 기업형 유통망 공략((주)하림)	407
(2) 개발된 축사바닥 깔짚 신소재의 유통 및 사업화 전략 구축	408
(가) 국내외 주요 수요처 현황	408
(나) 국내외 경쟁기관 및 기술 현황	408
(다) 표준화 전략	409
(라) 사업화 전략	409
(마) 투자 및 생산계획	410
(3) 개발된 축사바닥 깔짚의 탄소중립 효과	412
(가) 탄소중립 배경	412
① 지구온난화로 인한 전 세계적 탄소중립 배경	412
② 우리나라의 온실가스 배출특성 및 2050 탄소중립 선언	414
③ 농축수산 분야 탄소중립 전망 및 온실가스 감축 수단	415
④ 바이오차에 의한 탄소중립과 온실가스 감축	416
(나) 개발된 축사바닥 깔짚의 탄소중립 효과 산정	419
나. 정량적 연구개발성과	421
다. 세부 정량적 연구개발성과	425
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	433
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	435
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	436
7. 별첨 자료 (참고 문헌 등)	437

1. 연구개발과제의 개요

- 우리나라의 경제가 성장과 국민소득이 높아지면서 축산물에 대한 수요가 단기간에 급격히 성장하였고, 이를 통해 축산업 규모도 커졌음. 이에 국민 1인당 1일 에너지 공급량에서 축산물이 차지하는 비중이 1970년 3.1%에서 2015년 14.8%로 크게 증가하였음.
- 2000년대에 들어오면서 공장식 축산업의 부정적 측면이 제기되고 있음. 빈번한 가축 전염병 발생과 축산물 안전성 문제 제기, 대규모 사육 방식에 의한 악취와 환경오염 발생, 비인도적인 사육방식과 동물학대 문제 등이 있으며, 축산업으로 인한 환경오염이나 가축 질병 등의 문제가 꾸준히 제기되고 있음.
- 최근 축산산업의 발달로 인하여 축사의 규모가 집약적 및 대규모화됨에 따라 사육두수는 18년도 기준 26,148만두로 최근 10년간 45.9%(8,227만두) 지속적으로 증가하고 있음.

Table 1-1. 축산농가의 축종별 사육두수 현황 (단위 : 천두)

구 분	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
한 우	2,711	2,562	2,477	2,510	2,801	2,908	3,038	3,204	3,385
젖 소	427	424	408	399	408	407	409	406	397
돼 지	9,697	9,971	10,315	10,327	11,156	11,200	11,208	11,147	11,169
닭	151,837	163,016	167,228	141,381	174,023	175,010	180,352	169,139	171,560

(통계청, 2022년)

Table 1-2. 축산농가 규모화 및 전업화 추이

구 분		한육우	젖소	돼지	닭
농가당 사육 마릿수(마리)	2006	11	58	850	33,100
	2017	30	62	2,386	57,444
전업농 사육 비율(%)	2006	34	74	80	75
	2017	64	87	92	91
축산농가 수(백 호)	2006	1,902	83	113	36
	2017	984	66	44	30

주: 전업농 기준은 한육우 및 젖소 50마리, 돼지 1,000마리, 닭 3만 마리 이상

자료 : 통계청(각 연도). 「가축동향」.

- 이에 따라 가축분뇨 발생량 또한 최근 10년간 한우, 젖소, 돼지의 사육두수 증가율(4.6%)과 비슷하게 약 4%의 증가율을 보이며 해마다 약간씩 증가하고 있는 추세임.
- 2018년 기준 가축분뇨 처리량은 1,846백톤/일로 '09년 대비 85백톤/일로 약 4.8% 증가하였으며, 2012년 런던협약에 의한 해양투기가 금지됨에 따라 위탁처리 및 자원화에 대한 비중은 증가하고 있음.
- 축산분뇨는 유기질 및 무기질 비료 뿐만 아니라 작물 성장에 유익한 미생물들이 다량 함유되어져 있는 친환경적이며 가장 우수한 천연비료로 농작물 재배에 널리 사용되어져 왔으나 수거된 후 방치되면 수분, 악취 및 해충 등의 발생이 증가됨으로써 주변 환경을 오염시킬 위험성이 큼.
- 위탁처리, 자원화 및 정화처리에 의한 가축분뇨 처리량은 각각 438, 1309 및 104백톤/일로

자원화에 대한 비중이 매우 높음 (2018년 가축분뇨 자원화, 온나라 정책)

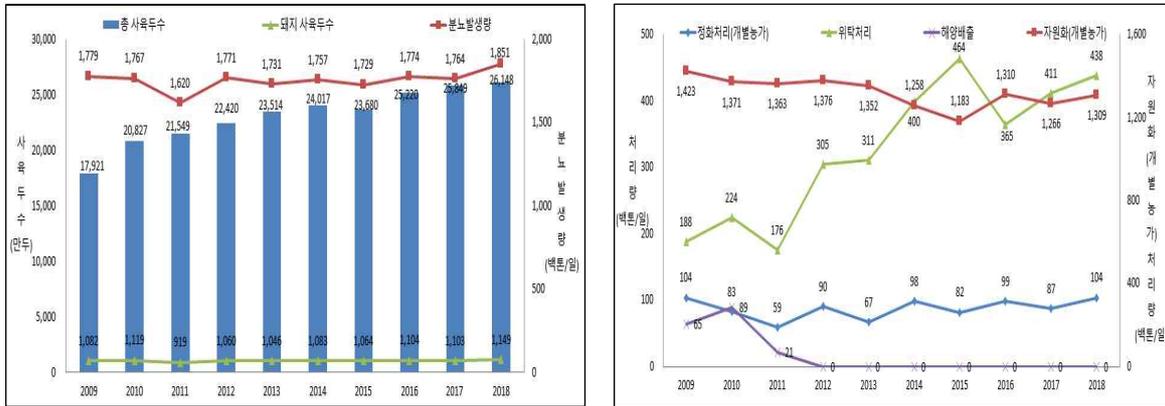


Fig. 1-1. 연도별 분뇨발생량 및 분뇨 처리방법.

- 가축종류별로는 돈분뇨의 경우는 99%가 위탁처리하고 있어서 자원화 비중이 상대적으로 낮지만 우분뇨와 같은 경우는 88%가 개별농가에서 퇴비로 자가 처리되고 있어서 자원화에 대한 의존률이 매우 높음. 특히 우분뇨의 자원화는 액비화 과정보다는 퇴비화 과정에 초점을 맞추어 수행되고 있음.
- 최근 우분뇨의 퇴비화 (우사깔짚)는 축사 바닥에 수분함량이 낮은 깔짚을 깔아 분과 뇨를 흡수 및 혼합되게 하고, 분뇨로 인해 깔짚이 수분을 더 이상 흡수하지 못하게 되면 이를 수거하여 축사 옆 퇴비 시설에 더미형으로 야적하여 퇴비화하는 방향으로 처리되고 있음.
- 특히 축분의 수분함량은 대략 70%~85% 정도로서 발효의 적정 수분인 55%~65% 수준을 초과하게 되며, 이는 퇴비더미 내부의 공극이 축소되어 발효에 필요한 산소의 공급이 현저하게 감소하게 됨에 따라 원활한 퇴비화를 기대할 수 없음.
- 또한 함수율 85% 이상에서는 호기성 퇴비화가 중지되고 혐기성 상태가 됨에 따라 악취가 발생하며 산 생성균의 활동에 따른 pH 저하로 퇴비화를 이룰 수 없게 됨. 반면에 함수율이 40% 이하에서는 퇴비화 미생물의 활성 저하로 발효 시간이 길어지게 된다. 따라서 초기 단계에서의 적정 수분 조절은 퇴비화에 있어 매우 중요한 요소임.

Table 1-3. 가축분뇨 배설량 및 함수율

구분	배설량 (kg/수,두/일)			함수율 (%)	
	분	뇨	계		
닭	산란계	0.125	-	0.125	74.9
	육계	0.086	-	0.086	74.9
한우	8	5.7	13.7	78.4	
젖소	19.2	10.9	30.1	82.3	

- 특히 가축분뇨의 비료화 방법은 톱밥 등을 혼합하여 퇴비화시키는 방법이 가장 진전되어 있으며, 이들 축산분뇨 퇴비는 완전히 완숙되지 못하게 되면 농작물의 burning 현상, 뿌리 썩음 현상, 산소 결핍 현상, 사료 작물의 오염, 토양의 산성화, 생육 억제, 악취 확산 및 해충 확산 등의 다양한 문제점이 발생할 수 있어 농가 보급을 위해 안정적인 부숙도 관리와 체계적·경제적인 퇴비화 기술개발이 시급한 실정임.

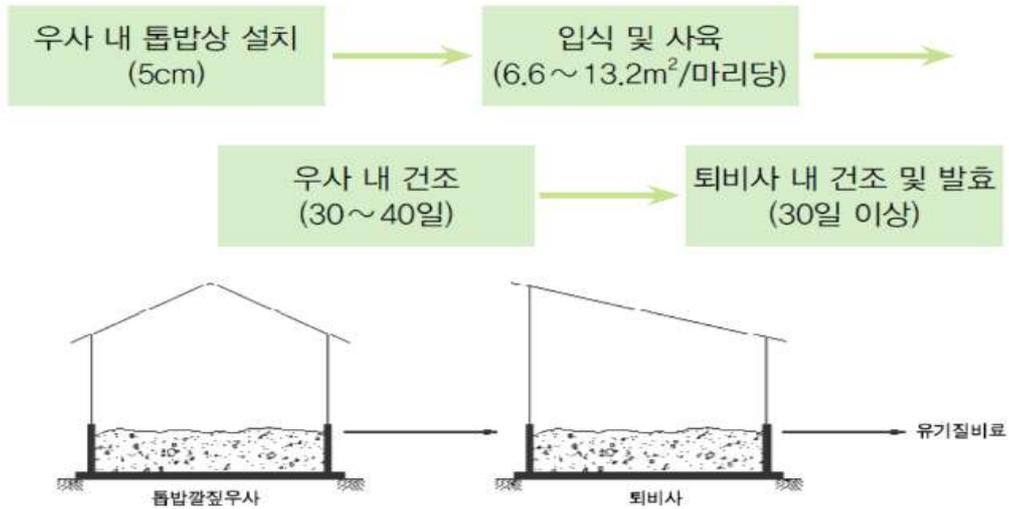


Fig. 1-2. 우사 깔짚과 퇴비화 과정.

- 지난 수십년간 축산농가는 안정적 퇴비 제품을 생산하기 위한 수분조절제로 톱밥 및 왕겨를 주로 이용해 왔으며, 최근에는 목질계 폐기자원을 활용한 다양한 수분조절제의 활용이 시도되고 있음.

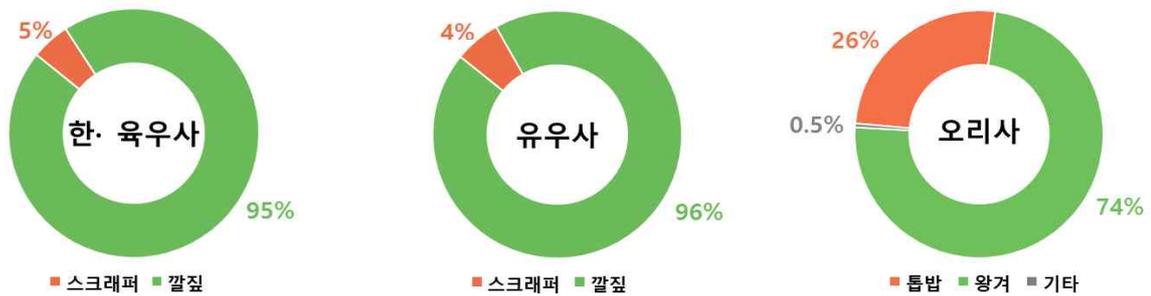


Fig. 1-3. 한우 및 가금류 수분조절제 사용현황.

- 국내 축사(우사)용 깔짚 자재 시장 규모는 2013년 추정치 기준 50만톤임(출처: 2011년, 농협중앙회 축산컨설팅부, '톱밥의 공급 및 전망'). 국내 공급은 매우 불안정하고 수분 흡수 품질도 불규칙하여 수입이 주로 유통되는데, 베트남 → 중국 → 러시아 → 인도네시아 순이며, 이미 낙농에서는 보편적으로 수입 톱밥을 사용하고 있으며, 가격과 공급 상황에 따라 대패밥과 MDF 톱밥까지 사용하고 있음.
- 양계 사육은 세계 어느 곳이든 평사와 케이지 2가지 형태로 평사 사육에서 중요한 부분은 바닥 관리이고, 이 바닥 관리의 주요 도구는 깔짚임. 육계와 오리 같은 실용계는 물론이고, 산란계 중추, 종계까지 포괄하면 바닥 관리는 농장 개별의 문제가 아닌 대한민국 양계 산업이 직면하고 있는 큰 숙제임.
- 바닥 관리는 계군의 건강 및 생산성에 지대한 영향을 미치는 요소 중 하나이며, 육계의 깔짚은 바닥의 오염과 열의 발산을 방지하고, 계분을 희석하여 표면을 깨끗하고 건조하게 유지해 주며, 계분에서 발생하는 수분과 닭이 호흡 시 발생하는 수분을 흡수하여 닭이 쉬고 성장하는데 쾌적한 생활 공간을 만들어 줌.
- 바닥 깔짚은 신선하고 오염되지 않은 것으로, 콘크리트 바닥의 경우 5cm이상, 흙바닥인 경우 10cm 이상 두껍게 깔아줌. 깔짚의 구비 조건으로는 수분이 20~25% 함유된 재료로써, 수분의 흡수력이 좋고 통기성이 좋으며 수분의 증발력이 양호해야 하며 값이 싸고 구하기 쉬우며 먼지나 곰팡이 등에 오염되지 않아야 하고, 닭에게 폭신하고 안락감을 줄

수 있는 재질이어야 함.

- 일반적으로 닭은 사료 섭취 후, 음수한 다음 바닥에 편안히 엎드려 있으며, 사람이 멀리 떨어져 안심하게 되면 날개를 살짝 펴서 바닥에 팔을 펴고 엎드린 것처럼 자세를 만듦. 그런데, 바닥이 질고 습이 많으면, 피부가 닿는 곳이 붙어서 뭉개지고 세균이 감염되며 괴사 또는 수종이 생겨 B급이 발생됨.
- 톱밥의 경우 수분흡수능이 우수하고, 다른 부자재에 비해 취급이 용이하고 초기 퇴비화 과정에서 악취 원인물질의 흡착과 같은 장점이 있으나 톱밥원료 대부분이 수입목에 의해 충당되고 있어 지역적으로 톱밥의 가격편중이 심한 상태로 경제성이 부족함.
- 톱밥대용으로 왕겨가 많이 사용되고 있으나 톱밥에 비해 수분흡수율이 1/3수준으로 낮아 왕겨를 가공하여 수분조절제도 이용하고 있으나, 이 과정에서 비용이 증가하게 되고 계절적 영향으로 인하여 일일 배출되는 가축분뇨를 퇴비화하기 위해서는 제한적임.

Table 1-4. 수분조절제의 물리화학적 특성비교

구 분	함수율(%)	흡수율(%)	비중(g/L)	회분(%)	질소(%)	총탄소(%)	산도
톱 밥	26.9	272.4	182	0.59	0.07	55.2	6.5
왕 겨	13.0	125.0	115	14.5	0.36	47.5	8.47
분쇄왕겨	12.0	165.0	185	13.8	0.36	47.9	7.24
팽연왕겨	16.0	205.0	235	17.9	0.43	45.6	7.82
목 편	11.4	72.3	184	0.23	-	55.4	5.87
수 피	18.0	55.7	239	3.16	0.46	53.8	5.55
솔 잎	15.9	168.7	94	1.98	0.43	54.5	4.58
땅콩껍질	6.0	186.0	38	1.74	-	54.6	5.54
대 패 밥	7.7	252.9	-	0.17	-	55.5	4.98
볏짚(1cm)	13.9	244.0	70	9.5	-	50.3	7.58
제올라이트	6.5	43.9	1,061	91.7	-	4.6	7.55
ALC(0.5cm)	9.2	102.1	402	86.1	-	7.7	9.13
ALC(0.1cm)	17.6	51.9	824	78.2	-	12.1	9.13
고 토	0.04	31.7	1,159	99.2	-	0.43	9.34

※ ALC : 경량기포 콘크리트 (규산질 다공체)

- 또한, 수분조절제를 사용하였지만 적정 수분함량을 맞추지 못할 경우 추가적인 수분조절에 장시간이 소요되고, 제한적 축사 내 퇴비 시설 공간은 일일 배출되는 가축분뇨로 점진적으로 야적량이 증가되고, 최종적으로 완숙된 퇴비를 안정적으로 생산하는 것은 거의 불가능하게 됨.
- 특히 미완숙된 퇴비의 토양처리 시 토양오염 뿐만 아니라 C/N비가 맞지 않아 양분 불균형 현상을 초래하여 식물의 생육을 저하시키며, 악취로 인하여 많은 민원이 발생하게 됨.
- 이로 인해, 2020년 3월 25일부터 가축분 퇴비 부숙도 검사 의무화가 시행됨에 따라 가축분뇨를 퇴비화하여 배출하는 농가는 부숙도 기준을 준수해야 하나 현장에서는 부숙도 검사가 시행되는지조차 모르는 농가들이 많고, 아울러 퇴비사를 넓힐 수 없는 농가 현실과 함께 부숙도 측정을 위한 인력과 장비도 턱없이 모자라는 실정임.

관계부처 합동		보도자료		(배포) 2020.3.24(화)
2020년 3월 25일(수) 조간부터 보도 (인터넷, 통신, 방송은 3월 24일(화) 12시부터)				
비고	* 공동배포 : 환경부, 농림축산식품부			
담당	환경부 물환경정책과	과장 정희규, 사무관 이주원 (044-200-7001, 7010)		
	농림축산식품부 축산정책과	과장 박정훈, 사무관 문원탁 (044-201-2311, 2317)		
3월25일부터 가축분 퇴비 부숙도 검사 의무화 시행 1년간 계도기간 운영 ◆ 2015년 3월 「가축분뇨법」 시행령 개정 이후, 5년간의 유예기간을 거쳐 2020년 3월25일부터 시행 ◆ 현장의 준비 상황 등을 감안하여 1년간의 계도기간을 부여, 계도기간 동안 행정처분 유예, 적극적인 농가 이행지원 추진 □ 환경부(장관 조영래)·농림축산식품부(장관 김현수, 이하 농식품부)는 금년 3월 25일부터 퇴비 부숙도 검사 의무화 제도가 시행된다고 밝혔다.				

퇴비부숙도 기준 적용대상 농가 어렵!

배출시설면적

1 모든 가축의 퇴비 부숙도 적용기준
후기·원료 1,500㎡ 이상

중기 1,500㎡ 미만

2 성분검사 주기
허가대상 농가 6개월에 1회 검사

신고대상 농가 1년에 1회 검사

2020년 3월 25일부터 검사 의무화!

가축분뇨를 퇴비화하여 배출하는 농가는 부숙도 기준을 준수해야 합니다

Fig. 1-4. 퇴비 부숙도 검사 의무화.

- 실제 ‘한우 퇴비 부숙도 검사 의무화 단기적 대응방안연구’ 결과, 전체 조사 대상 농가 중 1500㎡ 이상의 대규모 농가는 부숙 장비를 100% 보유하고 있었지만, 1500㎡ 미만 농가 중 장비를 보유하고 있는 농가는 67%에 불과하며, 퇴비 부숙도 기준을 법제화하여 퇴비의 부숙도 기준을 위반할 경우 최대 200만원 이하의 과태료가 부과됨.
- 또한 배출시설 면적에 따라 허가규모의 농가는 6개월마다, 신고규모의 농가는 1년마다 부숙도 검사를 실시하고, 허가규모는 한우·젖소 900㎡ 이상, 돼지 1000㎡, 닭 3000㎡이며, 신고규모는 한우·젖소 100㎡ 이상, 돼지 50㎡, 닭 200㎡임.
- 퇴비는 보통 6개월간 부숙해야 하는 반면, 대부분의 우사의 경우 분기에 한 번씩 분뇨를 치우기 때문에 1월에 치운 분뇨와 4월에 치운 분뇨가 섞이면 부숙도가 떨어지기 때문에, 퇴비사 공간 확충과 함께 공간을 분리해 분뇨를 별도로 관리해야 함.
- 최근 가축분뇨의 퇴비화 과정에서 발생/용출되는 암모니아 및 온실가스과 같은 대기오염 물질과 이온성 부영양화 유발물질로 인하여 대기, 토양 및 수계에 오염사례가 빈번하게 발생되고 있음.
- 가축 사육과정에서 발생하는 악취, 폐수, 먼지, 소음 등의 다양한 사안들이 국민 생활환경과 자연환경에 악영향을 미치고 있으며, 대표적으로 악취 민원 건수는 2001년 2,760건에서 2016년 24,748건으로 약 9배 증가하였으며, 이 중 축산 악취 민원은 전체 민원에서의 비중이 가장 높았음 (2016년 전체의 25.9%).
- 이상의 문제점들과 사례들을 종합적으로 검토할 때, 퇴비화 과정에서 발생하는 환경적인 문제를 최소화함과 동시에 효율적 및 경제적으로 완숙된 퇴비를 안정적으로 생산하기 위해서는 깔짚 소재부터 퇴비화까지 연계하는 시스템적인 개선이 필요함. 특히 현재 깔짚으로는 축사의 효율적 운영 이외에 안정적인 완숙퇴비를 만드는데 많은 시간과 경제적인 문제가 발생하므로 부숙화 효율을 고려한 새로운 깔짚소재 개발이 절실히 요구되고 있는 실정임.
- 이에 본 연구에서는 깔짚으로서의 기본 필수기능인 수분조절 능력과 사용 후 퇴비화된 완숙퇴비의 농업적 활용도를 높이는 다양한 소재 중 수분조절 능력이 뛰어나고 탄소격리효과와 악취 및 온실가스 저감과 토양개량능력이 우수한 바이오차를 활용하고자 하며, 추가적으로 부숙율을 조절하기 위한 미생물제를 일반적인 수분조절제인 톱밥/왕겨/이탄 등과 혼합하여 가축분뇨 배설시 수분조절과 저온 퇴비화가 진행되는 새로운 패러다임의 고기능성 친환경 깔짚 소재를 개발하고자 함.
- 최근 바이오차(biochar)는 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 악취 저감에 효과적인

물질로 보고되었으며, 바이오차가 혼합된 퇴비의 품질 또한 우수하다고 보고되었음. 바이오차는 비표면적이 넓은 다공성 구조로 이루어져 있어서 깔짚으로서의 수분조절능력이 매우 우수하고, 퇴비 더미 내부에 산소의 공급을 원활히 하여 호기성 미생물에 의한 발효를 가속화 하여 고품질의 퇴비를 단시간 내에 제조할 수 있을 것으로 판단됨.

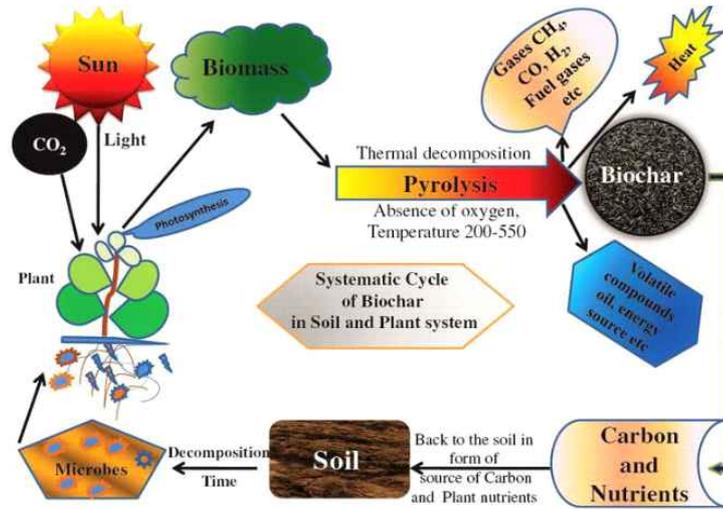


Fig. 1-5. 바이오차의 순환과 기능.

- 이러한 바이오차의 기능적 우수성에도 불구하고 깔짚으로의 활용은 매우 미흡한 실정이며, 깔짚으로 활용하기 위해서는 경제성과 효율성의 체계적인 검증과정이 필요한 실정임. 또한 바이오차의 경우 원료의 특성과 열분해 조건에 따라 물리화학적 특성이 달라 균질화하기 어려운 문제와 현재 시장의 특성상 높은 경제성을 확보하는 것도 활용에 걸림돌이 되고 있음.
- 하지만 최근 본 연구진은 바이오차의 경제성과 균질화 방안을 제시하여 깔짚으로의 가능성을 확보하게 되었음. 본 연구진의 선행연구결과, 바이오매스 전소발전소에서 발생하는 저회 (Bottom ash)의 경우 그 구조와 특성이 현행 목질계 biomass의 혐기적 열분해로부터 생산된 바이오차와 유사하다는 것을 밝혀냄. 특히 이 바이오차는 발전과정에서 나오는 부산물로 바이오차 생산과정에 추가적인 열이 필요 없어 경제성을 확보하고 있으며, 최고 등급의 우드펠릿을 사용하여 항상 동일한 성분의 균질한 바이오차를 생산할 수 있음.
- 바이오매스 전소발전소는 최근 미세먼지 문제의 주요인으로 석탄화력발전이 인식되어 조기 폐쇄가 추진 중 일부(한국남동발전(주))에서 노후석탄화력을 우드펠릿으로 연료를 전환하는 과정에서 현재 운영중에 있음.
- 한국남동발전 영동 1호기의 경우 우드펠릿의 사용으로 인하여 발생하는 바이오차의 1일 발생량은 19톤으로 향후 우드펠릿을 원료로 사용하는 발전소가 증가함에 따라 이들 발생량은 급격히 증가될 것으로 예측됨.

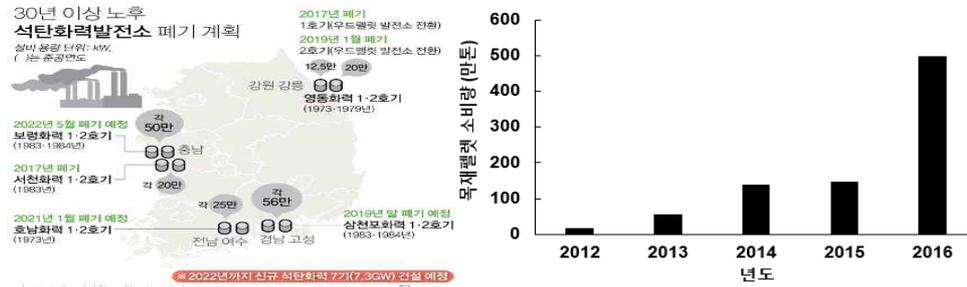


Fig. 1-6. 노후 석탄화력 발전소 폐기 계획 및 목재펠릿 소비량.

- 특히, 영동본부는 2018년 11월말 기준 저회 발생량 8,600톤을 전량매립하고 있으나 회처리장의 만지로 인하여 매립처리하는 것은 한계에 도달하여 이들 바이오차의 재활용방안이 요구되고 있음.
- 본 연구진의 연구에 의해 바이오매스 전소발전소 발생회인 저회가 바이오차로 비료로 등록되었으며, 이러한 연구결과로 인해 바이오차의 경제성과 균질성의 확보가 가능하게 되었음.
- 이에 경제성과 균질성을 확보한 바이오매스 전소발전소에서 배출되는 바이오차를 퇴비화 과정에 혼입할 시 퇴비 과정에서 발생하는 환경적인 문제를 최소화하고 고품질의 퇴비를 생산할 수 있을 것으로 판단됨.
- 또한 본 연구에서는 톱밥과 왕겨를 대체할 대체제로 이탄이나 피트모스 등을 활용하는 방안도 고려할 예정이며, 일반적으로 이탄은 식물이 습기가 많은 지역에 완전히 썩지 못하고 퇴적 및 발효되면서 점차 탄화되어 만들어진 것을 말하며, 이들의 유기물은 70% 정도로 수분흡수력과 양분 보유능이 우수하며, 특히 톱밥에 함유되지 않은 미량원소 등이 다량 함유되어 있어 기존 톱밥을 대체함과 동시에 퇴비품질을 향상시킬 수 있을 것으로 판단됨.
- 본 연구에서 부숙도 조절을 위한 미생물제제는 연구진이 자체 보유하고 있는 *Lactobacillus Sakei*와 일반적으로 사용되고 있는 부숙 미생물(*Bacillus spp.*, *Trichoderma sp.*, *Pseudomonas spp.*, *Streptomyces spp.* 및 *Saccharomyces sp.*)을 혼합한 복합미생물제를 활용하여 연구를 진행할 계획임.

Table 1-5. 퇴비화에 사용되는 일반적인 미생물

미생물 종류	퇴비화 기능
<i>Bacillus spp</i>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 유기물의 분해능력이 매우 우수 ○ 병원성균 생육억제 항생물 다량 분비하여 병원균의 밀도를 낮춤 ○ 각종 생리 활성물질을 분해하여 식물의 지하부 생육을 촉진
<i>Trichoderma sp</i>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 토양전염성 병원균을 억제하는 효과 ○ 식물잔사를 분해하여 병원균의 서식처를 근절 ○ 현재 식물병 방제용 토양미생물로 널리 알려져 있음
<i>Pseudomonas spp</i>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 유기물 분해력과 병원성 곰팡이 억제력이 매우 뛰어난 미생물 ○ 이들 미생물의 밀도가 높은 토양은 병해억제력이 매우 높음
<i>Streptomyces spp</i>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 난분해성 유기물을 분해하여 부식을 형성 ○ 병원성 곰팡이의 키틴질을 분해하는 천적 미생물 ○ 병원균 제어 항생물질을 생성하여 토양의 병해 억제능력을 높임
<i>Saccharomyces sp</i>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 유기물 분해능력 우수 ○ 아미노산, 당류, 토양 중의 유기물로 작물성장에 필요한 물질 생합성 ○ 생리활성물질을 생성하여 뿌리세포분열을 촉진하여 유익균의 증식에 필요한 기질을 생성

- 이와 같이 깔짚에 부숙 미생물 처리는 가축분뇨 내에 유기물 분해를 가속화 시키고 병원균의 증식을 억제하기 위하여 사용되며, 본 연구에서 우사나 계사용 깔짚에 미생물이 혼합된 발효깔짚을 사용하여 가축으로부터 배설물이 배출되면 수분조절과 함께 저온 발효가 진행될 수 있게 하여 부숙시간을 단축하고 부숙도를 안정적으로 관리할 수 있게 됨.
- 종래의 축사바닥 깔짚에 대한 퇴비화와 본 연구에서 개발된 우사깔짚에 의한 퇴비화 과정을 절차는 다음과 같이 가축분뇨를 혼합하여 수분함량이 높은 깔짚을 수거하여 퇴비화가 시작되는 고전방식의 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서 개발된 축사바닥 바이오차 발효깔짚을 이용하게 되면 가축의 배설물이 배출되는 즉시 바이오차와 미생물 및 부숙제(톱밥/피트모스)의 영향으로 수분이 조절되게 되며, 악취가 저감, 질소손실 억제 및 저속 부숙화가 일어나게 되며, 퇴비시설로 이동된 후 퇴비화가 완료되어 부숙시간을 줄이고, 부숙기간을 안정적으로 확보하여 고품질의 퇴비를 생산할 수 있을 것으로 판단됨.
- 특히 본 연구에서 개발될 축사바닥 바이오차 깔짚은 기존 퇴비화 과정에 대한 문제점을 보완함과 동시에 친환경적이며, 고품질 퇴비를 생산할 수 있는 창의적이고 획기적인 새로운 패러다임의 축산소재 기술개발이 될 것임.
- 따라서 본 연구의 목적은 바이오매스 전소발전소 발생 바이오차를 이용한 고기능성 축사바닥 깔짚(한우 또는 가금용) 소재 개발 및 실용화이며, 연차별 세부목표는 1차년도에 경우 축사바닥용 바이오차 깔짚 소재 제조 원천기술을 개발하고, 2차년도에 실제 농가에 적용 가능한 축사바닥 바이오차 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술을 개발하며, 최종 3차년도에 축사바닥용 바이오차 깔짚 소재의 실용화 및 산업화를 추진할 계획임.

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

가. 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 제조 원천기술 개발

1) 축사바닥 깔짚 소재 제조 원천기술 개발

가) 다양한 수분조절제 및 보조제들의 이화학적 특성 평가

(1) 공시재료

(가) 수분조절제

본 시험에 사용된 수분조절제는 톱밥, 왕겨, 피트모스, 코코피트 및 대패밥을 사용하였다 (Fig. 2-1). 톱밥 및 대패밥의 경우 국내 목재 가공 공장으로부터 발생한 것을 이용하였으며, 배출된 전체 톱밥 및 대패밥 중 작은 입자를 걸러내고 훈증소독과정을 거친 후 압축하여 1m³ 단위의 백에 포장하여 국내에 수입 및 농가에 판매되는 것을 구매하여 이용하였다. 피트모스 및 코코피트는 각각 유럽 및 베트남에서 생산하여 국내로 수입되는 제품을 본 과제의 참여기관인 (주)케이아그로에서 확보하여 사용하였다. 왕겨는 경남 진주시 인근 축산농가로부터 확보하여 본 연구에 사용하였다.



Fig. 2-1. 본 실험에 사용된 톱밥, 왕겨, 피트모스 및 코코피트.

(나) BPP-BA

본 실험에 사용된 바이오차 (BPP-BA)는 한국남동발전 영동 에코발전본부에서 발전과정에서 발생한 것을 채취하여 사용하였다 (Fig. 2-2). 바이오차는 우드펠릿 전소 발전소에서 우드펠릿이 연소된 후 보일러 호퍼 내 하부에 쌓인 것을 채취하여 사용하였다. 채취된 바이오차는 110°C에서 24h 동안 dry oven에서 건조 후 사용하였다.

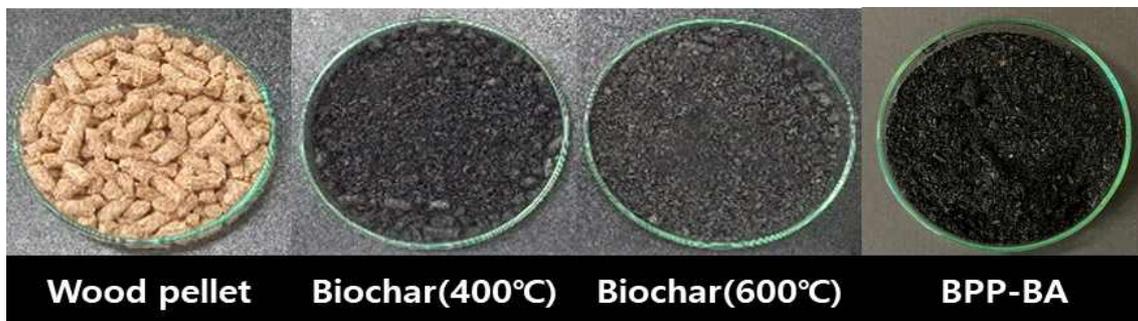


Fig. 2-2. 목재 펠릿 기반 biochar 및 바이오매스 전소발전소로부터 배출된 BPP-BA.

(다) 미생물

본 실험에 사용된 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae*로 총 3종이었으며, 이들은 본 과제의 참여기관인 흙사랑 영농조합법인에서 사용하고 있는 각 균주를 분양받아 사용하였다.

(2) 이화학적 특성 평가

(가) 화학적 특성

수분조절재의 화학적인 특성은 폐기물 및 토양 공정시험분석법에 준하여 실시하였다. pH 및 EC는 pH meter (Orion research, USA)와 EC meter를 이용하여 측정하였으며, 유기물 및 질소의 함량은 각각 회화법과 킬달법에 의해서 측정하였다. 또한 수분조절재 내에 무기성분 및 중금속 함량은 각 수분조절재를 황산:과염소산 (1:1) 용액으로 습식분해하여 전처리 한 뒤 ICP-OES (Optima 5300 DV, PerkinElmer, USA)를 이용하여 측정하였다.

(나) 물리적 특성

수분조절재의 물리적 특성은 수분함량, 수분흡수율, 가밀도, 유효입경 및 비표면적을 각각 조사하였다. 수분조절재들의 수분함량은 가열감량법을 이용하여 측정하였다. 또한, 각 수분조절재들의 수분흡수율은 수분조절재의 부피가 같도록 칭량하여 여과백에 넣고, 이를 비커에 3 반복으로 침지하여 측정하였다. 수분조절재를 넣은 여과백은 증류수가 담긴 비커내에서 24시간 침지시킨 후 꺼내어 상온(25℃)에서 30분간 방치하여 표면수를 제거하고 여과백에 남은 수분조절재의 무게를 측정하였고, 젖은 여과지의 무게는 미리 칭량하여 제외하였다. 각 수분조절재의 수분흡수율은 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{수분흡수율 (\%)} = \text{수분흡수 후 시료무게} / \text{수분흡수 전 시료무게} \times 100$$

수분조절재의 비표면적 (surface area) 측정은 ASAP-2020M analyzer (USA)를 이용하였으며, 유효입경은 체거름하여 중량분석으로 실시하였다.

(다) 구조적 특성

본 연구에 사용된 수분조절재, BPP-BA 및 biochar의 구조적인 특성은 X-ray photoelectron spectrometer (XPS, Thermo Fisher Scientific, USA), Scanning electron microscopy-their energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS, Philips XL 30S FEG, Netherland) 및 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR, PerkinElmer, USA)을 이용하여 표면 관능기, 결정형구조 및 특성을 관찰하였다.

나) 축사바닥 깔짚 소재의 최적화

(1) 깔짚 소재로서 최적의 수분조절재 선정

깔짚 소재로서 최적의 수분조절재를 선정하기 위하여 톱밥, 왕겨, 피트모스 및 코코피트를 가축분뇨 중량대비 1:10의 조건으로 혼합하여 스티로폼 퇴비화 장치 내에 주입하고, 60일간 퇴비화하였다. 본 실험에 사용된 퇴비화조는 원활한 산소공급을 위하여 공기주입기를 이용하여 분당 0.1 L 산소가 주입되게 설정하였으며, 내부 온도계를 설치하여 퇴비화 시간에 따른 온도변화를 관찰하였다 (Fig. 2-3). 또한 각 수분조절재가 포함된 가축분뇨의 퇴비화 효율을 향상시키기 위하여 15일 간격으로 뒤집기를 실시하였으며, 퇴비화 60일 이후 제조된 퇴비의 품질특성 및 부숙도 평가는 농촌진흥청 비료품질검사법에 의해 실시되었다. 또한 본 실험의 경우 주변 온도변화에 따른 퇴비화 효율을 평가하기 위하여 주변 온도를 25, 35, 45 및 55℃로 설정하여 수행하였다.



Fig. 2-3. 소형 퇴비화조의 구성 및 전경.

(2) 수분조절재 및 보조제들의 성형조건에 따른 최적화

(가) 수분조절재 크기

고품질 깔짚소재 개발을 위한 수분조절재의 크기를 선정하기 위하여 톱밥, 코코피트 및 피트모스를 분쇄기를 이용하여 <0.5 mm, 0.5-1.0 mm 및 1.0-4.0 mm으로 분쇄하였으나 시료의 경제성 및 효율성을 위하여 원시료와 분말형태 (<0.5 mm)의 수분조절재만을 이용하여 (1)항의 실험과 같이 퇴비화 실험을 수행하였다 (Fig. 2-4).



Fig. 2-4. 분쇄된 톱밥, 코코피트 및 피트모스

(나) BPP-BA 적용비율 및 크기

본 연구에서 바이오차 혼합깔짚에 BPP-BA의 적용비율을 선정하기 위하여 피트모스에 BPP-BA의 비율을 9:1, 8:2 및 6:4로 조절하여 퇴비화 실험을 수행하였고, BPP-BA가 입상일 때와 분상일 때 퇴비화 효율을 평가하기 위하여 Fig. 2-5과 같이 BPP-BA를 분말화하여 피트모스 및 코코피트에 혼합하여 바이오차 혼합깔짚을 조제하고, 이들을 가축분뇨와 혼합하여 퇴비화 실험을 수행하였다.

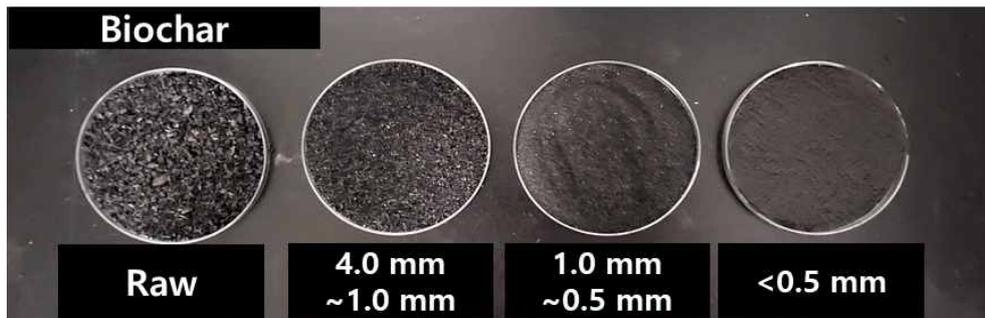


Fig. 2-5. Biochar 분쇄 및 균일화 사진.

(다) 미생물 제형

미생물의 제형에 따른 바이오차 혼합깔짚을 개발하기 위하여 혼합미생물 (*Bacillus spp.*, *Trichoderma sp.*, *Pseudomonas spp.*, *Streptomyces spp.* 및 *Saccharomyces sp.*)의 제형을 액상 및 고상으로 구분하고, 고상의 경우는 입상과 분상으로 구분하여 퇴비화 실험을 수행하였다 (Fig. 2-6). 각 미생물제를 피트모스와 BPP-BA가 8:2로 혼합된 바이오차 혼합깔짚에 접종하여 상기 (1)항과 같이 퇴비화 실험을 수행하였다.



Fig. 2-6. 본 실험에 사용된 미생물제 제형

(3) 수분조절제 및 보조제들의 최적 혼합비율 결정

(가) 수분조절제:BPP-BA:미생물제 혼합비율

상기 (2)항의 결과 선정된 수분조절제 및 BPP-BA의 최적혼합비율을 결정하기 위하여 피트모스:코코피트:BPP-BA의 혼합비율을 6:2:2, 4:4:2, 2:6:2로 구분하여 퇴비화 실험을 수행하였다. 또한 최적 혼합된 깔짚에 미생물제를 단독 및 혼합균주로 제조하여 깔짚의 부피대비 3%를 접종하여 퇴비화 효율 및 품질특성 평가를 수행하였다. 미생물제는 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae*을 사용하였으며, 혼합균주의 경우는 각 미생물을 동일한 비율로 혼합하여 사용하였다. 본 시험에 사용된 단일 및 혼합미생물의 생육 전경은 Fig. 2-7에서 보는 것과 같다.

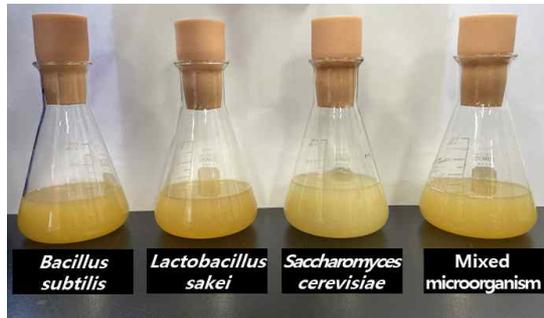


Fig. 2-7. 본 시험에 사용된 미생물의 생육전경

(나) 최적비율로 혼합된 깔짚 소재의 이화학적 분석 및 안전성 평가

상기 (1)-(3)항에서 결정된 최적조건들을 적용하여 최적비율로 혼합된 깔짚 소재를 제조하였고, 그들의 이화학적 분석은 앞서 언급된 수분조절제 및 보조제의 이화학적 특성 평가와 동일하게 수행하였으며, 혼합된 깔짚 소재의 안정성 평가는 중금속 함량을 측정하여 평가하였다. 또한 최적 비율로 혼합된 깔짚 소재를 가축분뇨와 일정 비율로 혼합하여 퇴비화 실험을 수행하였고, 최종 생산된 퇴비의 품질과 안정성 평가를 실시하였다. 특히, 생산된 퇴비의 안정성 평가는 대장균 및 살모넬라균의 검출 여부로 판단하였으며, 그와 관련된 실험은 농촌진흥청 비료품질검사법에 의거하여 수행하였다.

다) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 기술 확립

(1) 가축분뇨 (우분뇨)

본 실험에 사용된 가축분뇨는 경남 진주시 대곡면에 위치한 우사로부터 직접 수거하였으며 (Fig. 2-8), 본 시험에 사용된 우분뇨는 깔짚 효과를 명확하게 검증하기 위하여 농장주에게 요청하여 바닥에 어떠한 깔짚도 사용하지 않은 것을 사용하였다. 수거된 우분뇨의 화학적 특성은 Table 2-1에서 보는 것과 같이 수분함량이 85.2%로 매우 높았다.

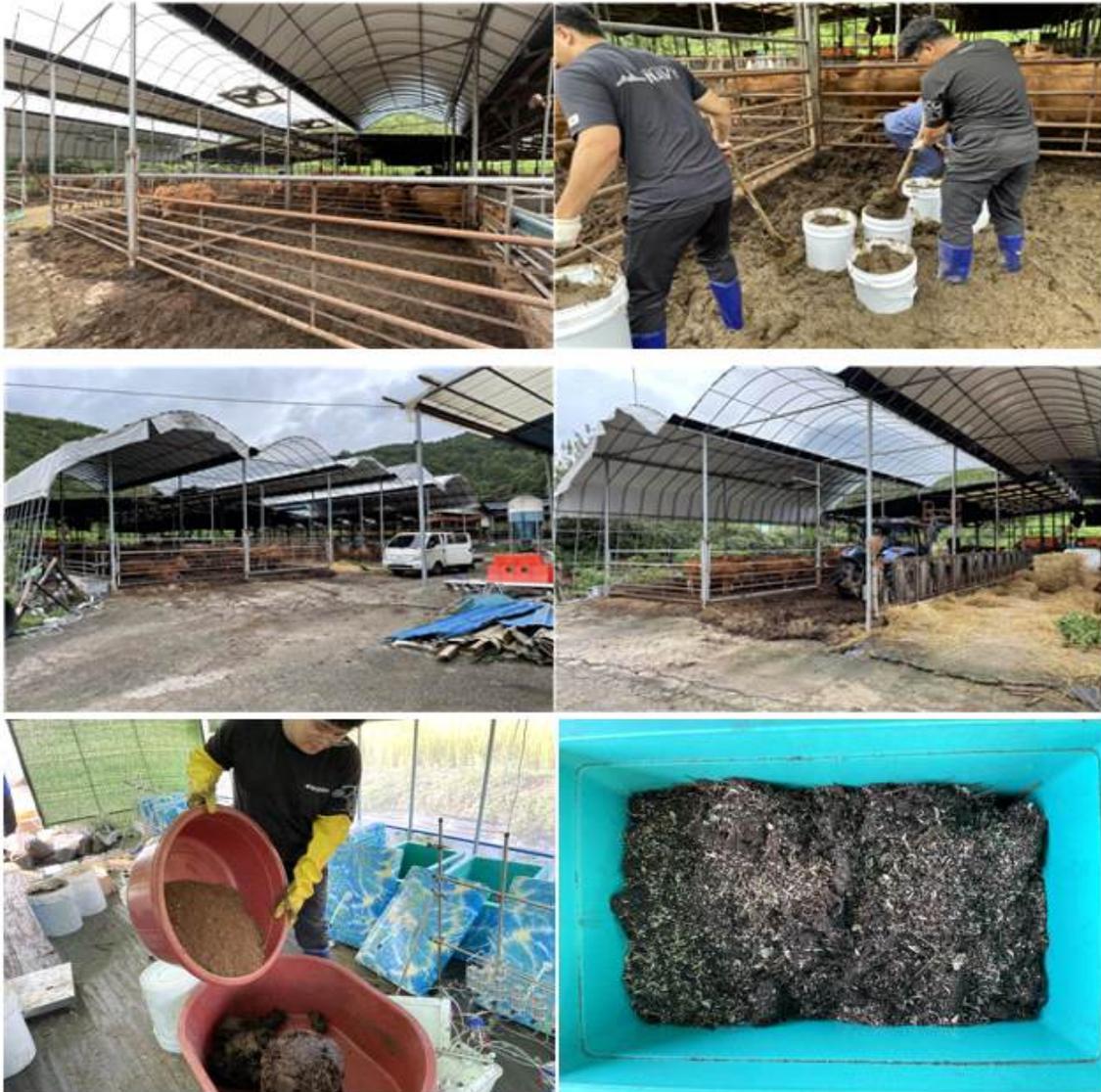


Fig. 2-8. 실제 우사로부터 우분뇨 수거 및 깔짚소재 혼합 전경.

Table 2-1. 본 실험에 사용된 우분뇨의 특성

pH	EC	Water content	OM	T-N	P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Salt content
	(dS/m)	----- (%) -----	-----	-----	-----	(mg/kg)	-----	-----	(%)
9.8	6.31	85.2	71.1	1.11	2.079	4.590	1.987	0.657	2.04

(2) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화를 위한 소형 퇴비화 장치 설계 및 제작

축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화를 위한 소형 퇴비화 장치의 개요도는 Fig. 2-9 및 16에서 보는 바와 같다. 퇴비화조의 72 L의 스티로폼을 사용하여 퇴비화 과정 중 발생하는 열의 손실을 방지하였으며, 퇴비화조 내 산소공급을 위하여 유량계가 부착된 에어펌프를 이용하여 분당 1 L/min의 공기를 주입하였으며, 퇴비화 조 전체에 산소가 고르게 유입되게 하기 위하여 통기관을 제작하여 퇴비화조 바닥에 고정하였다. 원활한 공기 흐름과 균질화된 퇴비를 생산하기 위하여 퇴비화 시작 후 20일 및 40일 후에 총 2회 실시하여 60일간 퇴비화 실험을 수행하였다. 그리고 퇴비화 과정 중 퇴비화조에서 발생하는 CO₂ 및 NH₃ 가스를 분석하기 위하여 상부에 가스포집기를 각각 설치하였다. 퇴비화 과정 중 발생하는 CO₂의 농도는 퇴비화 시간별 주사기를 이용하여 시료를 채취하였으며, GC (Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 퇴비화 과정 중 생성된 NH₃ 가스는 vacuum pump에 의해 유출관에 연결된 가스포집장치 (0.05N H₂SO₄)로 포집하였다. 또한 여기에 vacuum pump로부터 유입되는 이동상 공기의 유량을 정량적으로 조절하기 위하여 가스유량계를 설치하였다. 포집장치 내에 포집된 NH₃의 농도는 인도페놀법에 의해 분석하였다. 그리고 퇴비화과정 중 퇴비화조 내의 온도변화는 퇴비화조 내부에 온도 센서를 설치하여 24시간 실시간으로 자동 모니터링하였다.

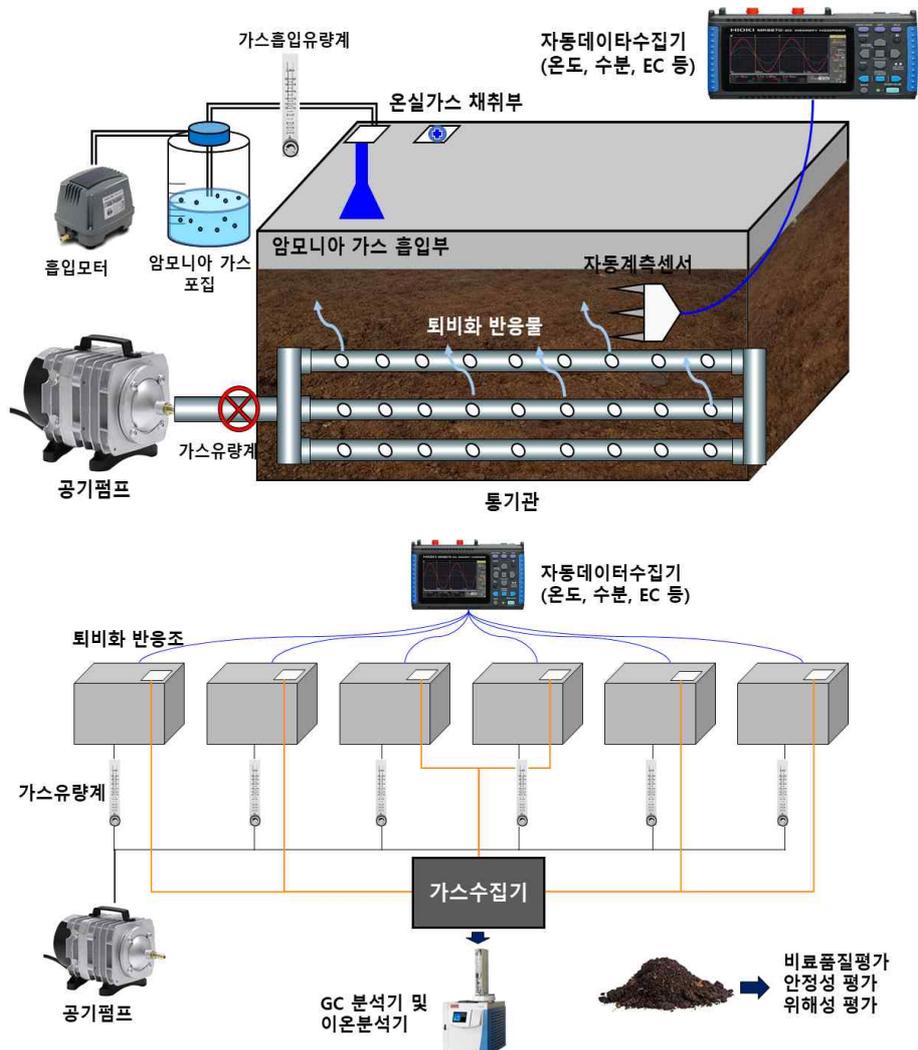


Fig. 2-9. 가축분뇨 퇴비화를 위한 소형 퇴비화 장치 설계도.



<통기관 설치>



<암모니아 가스 포집관 설치>



<통풍장치 설치>



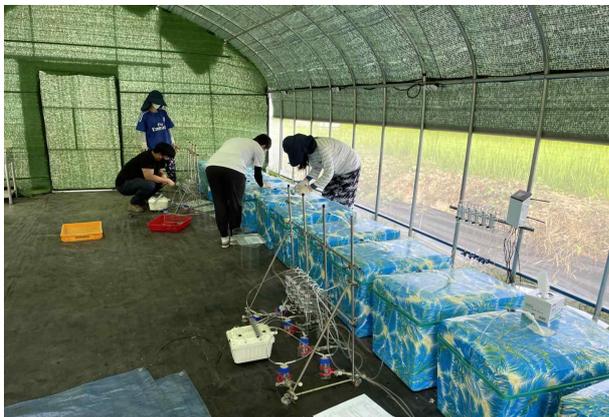
<온도센서 설치>



<퇴비화 장치 배관 연결>



<산소공급능 평가>



<퇴비화 장치 시운전>



<제작완료 전경>

Fig. 2-10. 축사바닥 깔짚 소재 개발을 위한 퇴비화 장치 제작 전경.

(3) 최적화된 깔짚 소재와 우분뇨 혼합비율 선정

최적화된 깔짚 소재와 우분뇨 혼합비율을 선정하기 위하여 가축분뇨 대 깔짚 비율을 10:2, 10:1 및 10:0.5의 비율로 혼합하여 구축된 퇴비화 장치에 주입하고, 퇴비화조 내에 송풍조건을 분당 1 L로 설정하여 퇴비화하였다.

(4) 최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 송풍조건 확립

최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 송풍조건을 확립하기 위하여 상기 (3)항의 최적조건인 가축분뇨와 깔짚의 비율 10:1에서 송풍조건을 0.5, 1 및 2 L/min으로 달리하여 퇴비화를 수행하였다.

(5) 최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 최적 온도 선정

최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 최적 온도 선정을 위한 실험은 상기 (3)항과 (4)항에서 선정된 최적 혼합비율과 송풍조건을 퇴비화 장치에 설정하고, 여름, 가을 및 겨울철 퇴비화 시설 내에 평균 온도를 기준으로 퇴비화 과정과 퇴비 품질을 평가하여 최적 온도를 제시하였다.

(6) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립

최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립 실험은 600 mL의 아크릴 챔버 내에 개발된 깔짚 소재를 5 cm로 깔고 우분뇨를 일일 16.9 g (면적당 사육두수와 분뇨배설량 고려)씩 지속적으로 주입한 후 수분 함량을 측정하여 개발된 깔짚 소재의 수분 흡수에 대한 허용한계치를 설정하고, 이 결과를 기반으로 우사에서 개발된 깔짚 소재를 이용할 수 있는 최대 일수를 확립하였다.

(7) 각 조건에서 생산된 우분 퇴비의 품질특성 및 안정성 평가

(가) 제조된 퇴비의 품질특성

각 조건에서 생산된 우분 퇴비의 품질특성 평가는 농촌진흥청 비료품질검사방법에 의거 유기물함량, 유기물대 질소비, 염분함량, 수분함량 및 염산불용해물 함량을 측정하였다.

(나) 부숙도 판정

각 조건에서 생산된 우분 퇴비의 부숙도를 평가하기 위하여 공정시험기준인 솔비타법과 종자발아법을 수행하였다.



Fig. 2-11. 솔비타법을 이용한 부숙도 시험.

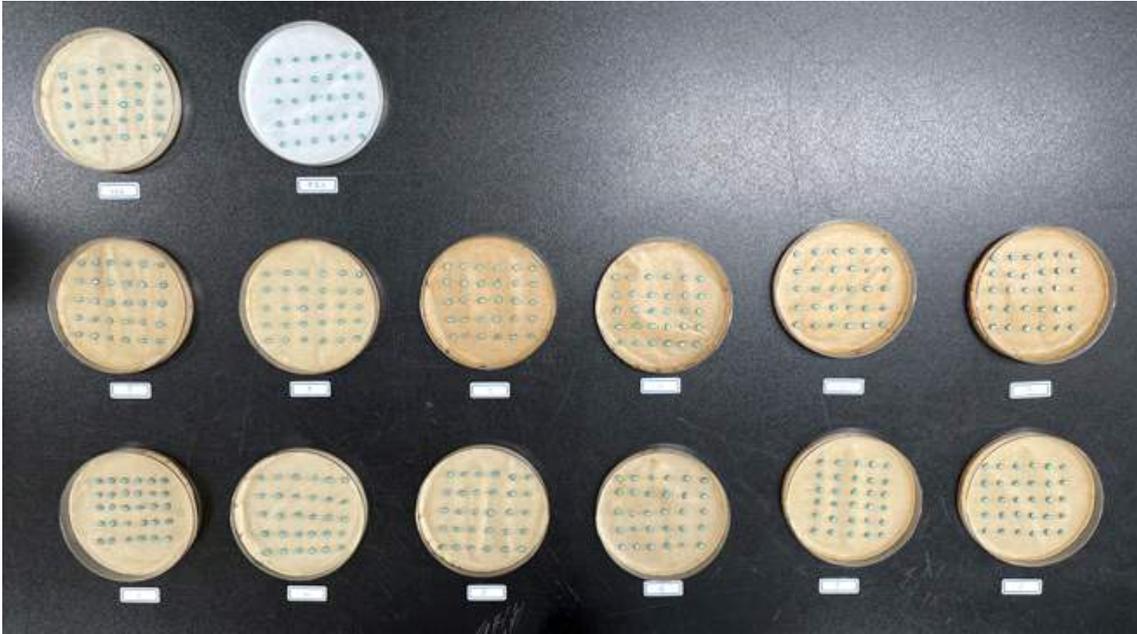


Fig. 2-12. 종자발아법을 이용한 부숙도 시험.

(다) 제조된 퇴비의 안정성

각 조건에서 제조된 퇴비의 안정성 평가는 농촌진흥청 비료품질검사방법에 제시된 유해성분인 8종의 중금속 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb 및 Zn) 함량을 조사하였으며, 대장균 및 살모넬라균 검출 여부를 평가하였다.

2) 축사바닥 깔짚 소재 적용 부숙미생물 배양 및 적용기술 개발

가) 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물 배양조건 확립

(1) 공시미생물

본 실험에 사용된 공시 미생물은 축사 깔짚의 부숙화 효율 증진을 위한 미생물로 유기물 분해 능력이 우수하고 악취 저감에 효과적인 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일 미생물을 사용하였으며, 각 미생물은 시험 전까지 4℃ 냉장 보관하여 사용하였다.

(2) 미생물 배양

본 실험에 사용된 각 미생물을 배양하기 위해 사용된 배지는 Table 2-2와 같이 멸균된 배지 (1% 탄소원, 0.5% 질소원, Na₂HPO₄ 6 g/L, KH₂PO₄ 3 g/L, NaCl 0.5 g/L, MgSO₄ 0.24 g/L, CaCl₂ 0.01 g/L) 150 mL에 미생물 1 mL을 접종한 후 30℃, 160 rpm에서 진탕배양 하였으며 (Fig. 2-13), 미생물 생육은 분광광도계를 이용하여 OD₆₀₀을 측정하였다.

Table 2-2. 퇴비화 미생물 생육 배지 조성

Carbon source	Nitrogen source	Na ₂ HPO ₄	KH ₂ PO ₄	NaCl	MgSO ₄	CaCl ₂
1%	0.5%	6 g/L	3 g/L	0.5 g/L	0.24 g/L	0.01 g/L

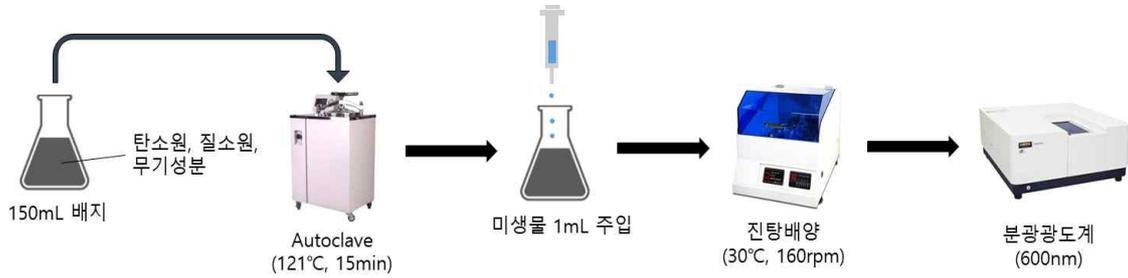


Fig. 2-13. 퇴비화 미생물 배양 방법.

(3) 실험조건

(가) 미생물 종류별 질소원에 의한 효과

본 실험에 사용된 미생물의 생육에 필요한 최적의 질소원을 선정하기 위해 기본배지 (Na_2HPO_4 6 g/L, KH_2PO_4 3 g/L, NaCl 0.5 g/L, MgSO_4 0.24 g/L, CaCl_2 0.01 g/L)에 탄소원인 Glucose를 1% 첨가하고 Peptone, Yeast extract, Urea, NH_4Cl 등 4가지 질소원을 각각 0.5%씩 첨가하여 각각 150 mL씩 제조한 후 고압멸균하였다. 고압멸균한 후 미생물이 포함된 배양액을 1 mL 접종하고, 30°C, 160 rpm의 조건으로 48시간 진탕배양하면서 일정 시간 간격으로 배양액 1 mL을 채취하여 OD_{600} 을 측정하였다.

(나) 미생물 종류별 탄소원에 의한 효과

본 실험에 사용된 미생물의 생육에 탄소원이 미치는 영향을 평가하기 위하여 최적 질소원으로 선정된 Yeast extract 0.5%가 첨가된 기본배지에 Sucrose, Lactose, Acetate, Citrate, Glucose 등 5가지 탄소원을 각각 1%씩 첨가하고 앞의 방법과 동일한 조건에서 진탕배양하고 배양액의 OD_{600} 을 조사하였다.

(다) 미생물 종류별 무기성분에 의한 효과

미생물 종류별 생육에 필요한 필수 무기성분을 선정하기 위해 최적 탄소원으로 선정된 Sucrose 1%와 최적 질소원으로 선정된 Yeast extract 0.5%가 첨가된 기본배지에 Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 등 4종의 무기성분을 각각 하나씩 제외하여 제조한 후 앞의 방법과 동일한 조건에서 진탕배양하고 배양액의 OD_{600} 을 조사하였다.

(라) 미생물 종류별 배양온도에 의한 효과

본 실험에 사용된 3종의 미생물의 생육에 필요한 최적의 온도를 선정하기 위해 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지에 미생물을 접종한 후, 5, 20, 30, 35°C의 온도 조건에서 160 rpm으로 진탕배양한 후 48시간 동안 일정 시간 간격으로 OD_{600} 을 측정하였다.

(마) 미생물 종류별 pH에 의한 효과

본 실험에 사용된 미생물의 생육에 pH가 미치는 영향을 평가하기 위하여 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지를 1M HCl과 1M NaOH를 이용하여 초기 pH를 5에서 9까지 pH 2 간격으로 보정하고, 앞의 방법과 동일한 조건에서 진탕배양하고 배양액의 OD_{600} 을 조사하였다.

(바) 미생물 종류별 교반속도에 의한 효과

미생물의 생육에 필요한 최적의 교반속도를 선정하기 위해 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지에 미생물을 접종한 후, 앞의 방법과 동일한 조건에서 60, 160 및 230 rpm으로 진탕배양하고 배양액의 OD₆₀₀을 조사하였다.

(사) 미생물 종류별 배양시간에 의한 영향

미생물 배양시간에 따른 생육 차이를 확인하기 위해 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지에 미생물을 접종한 후, 30°C에서 160 rpm, 168 h 진탕배양하면서 일정 시간 간격으로 배양액을 채취하여 OD₆₀₀을 측정하였다.

(아) 미생물 종류별 염분농도에 의한 효과

본 실험에 사용된 미생물의 생육에 필요한 최적의 염분농도를 선정하기 위해 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지의 염분농도를 분뇨의 염분인 2%를 기준으로 염분농도를 다르게 하여 각각 0, 0.05, 1, 2 및 2.5%로 배지의 염분을 조절한 후, 앞의 방법과 동일한 조건에서 진탕배양하고 배양액의 OD₆₀₀을 조사하였다.

나) 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물 대량배양 공정개발

(1) 살균 및 멸균 배양기 제작 및 시운전

미생물을 배양하기 위한 최적 살균 및 멸균 배양기를 제작할 때 미생물의 최적 온도를 설정하고 유지하기 위해 온도센서를 설치하였고, 호기 미생물 배양 시에 필요한 통기장치를 설치하여 배양기 내에 일정량의 공기가 주입될 수 있게 하였다. 또한 배양기 내를 고온의 증기로 살균하기 위해서 보일러 장치 및 증기 배출관을 설치하였으며, 배양기 내에 임펠러를 설치하여 미생물을 균질하게 배양하고자 하였다.

제작된 배양기를 시운전 하기 위해서 동결 보관된 균주로 seed culture를 1 L 제조하였고, 500 L로 대량배양하기 위해서 seed culture 1 L를 대량배양기에 전량 투입하였다. 대량배양기의 미생물 배양온도는 최적 배양온도인 30°C로 설정하였으며, 실험에 사용할 *Bacillus subtilis*, *Sacchromyces cervisiae* 및 *Lactobacillus sakei* 미생물 3종을 각각 48 h 동안 배양한 후 미생물의 배양이 정상적으로 이루어져서 충분한 생균수에 도달하였는지 확인하였다.

(2) 미생물 종류별 물리·화학적 배양조건 검토

미생물 배양조건 확립 실험에서 선정하였던 미생물 3종의 최적 탄소원과 질소원은 sucrose 및 yeast extract이었다. 최적 탄소원과 질소원을 사용해서 제조하여 각 배지를 500 L 대량배양기에 주입한 후, 같은 조건으로 미리 배양되어있는 seed 미생물 1 L를 대량배양기에 모두 투입하여 미생물의 생육 특성을 분석하였다. 미생물을 배양하는 물리적 배양조건은 3종 미생물의 최적 배양온도, 교반속도 및 배양시간인 30°C, 160 rpm, 48 h으로 하였다. 미생물의 생육 특성은 UV-VIS SPECTROPHOTOMETER (Perkinelmer, USA)로 600 nm에서 흡광도를 측정하여 분석하였다. 대량배양 실험 결과를 통해서 소규모 실험에서 설정되었던 최적 조건이 대량배양 공정에도 적용될 수 있는지 검토하였다.

(3) 최적 배양조건 도출

상기 (1)항 및 (2)항의 실험들을 종합적으로 검토하여 축사바닥 깔짚 소재 개발을 위한 대량 미생물 최적 배양조건을 확립하였다.

다) 혼합미생물 배양조건 및 공정 개발

(1) 미생물 혼합비율별 배양 최적 공정 확립

미생물 혼합비율별 배양 최적 공정을 확립하기 위해 *Bacillus subtilis*, *Sacchomyces cerevisiae* 및 *Lactobacillus sakei*의 혼합비율에 따른 미생물의 생육 특성을 분석하였다. 각각의 단일 균주를 미생물의 생균수가 1×10^8 CFU/mL로 될 때까지 배양한 후에 *Bacillus subtilis*, *Sacchomyces cerevisiae* 및 *Lactobacillus sakei*를 1:1:1, 2:1:1, 1:2:1 및 1:1:2 비율로 혼합하여 액상 배지에 접종한 후 미생물의 성장률을 분석하였다. 미생물을 배양하기 위한 배지는 실험에서 선정된 최적 배지 조건을 사용하였다. 각 미생물은 정해진 비율로 혼합하여 배지에 1% 접종하였으며, 배양시간 (0, 2, 4, 8, 12, 24, 36 및 48 h)에 미생물의 균수를 UV-VIS SPECTROPHOTOMETER (600 nm, Perkinelmer, USA)로 측정하여 최적 배양조건하에서 미생물의 생육을 비교하였다.

(2) Seed 액상배양 공정 확립

혼합미생물을 고상발효 및 고상흡착에 사용하기 위한 최적의 seed culture를 제조하기 위해서 seed 액상배양 공정을 확립하고자 하였다. 최적 배양조건을 확립하기 위해서 seed량, 배양 온도, 교반속도 및 공기압 배양시간 등의 조건을 달리하여 실험하였다. 이전의 실험에서 각 미생물을 배양하기 위한 최적 배양온도, 교반속도, 배양시간에 대한 조건은 확립이 되었기 때문에 본 연구에서는 확립된 최적 조건에서 seed량 (0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20, 50%) 및 공기압 (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2 vvm)에 따른 미생물 생육 특성을 시간에 따라 (0, 2, 4, 8, 12, 24, 36 및 48 h) UV-VIS SPECTROPHOTOMETER (Perkinelmer, USA)로 600 nm에서 흡광도를 측정하여 미생물의 생육을 비교하였다.

(3) 고상발효 공정 확립

혼합미생물의 고상발효 공정을 확립하기 위해서 대두박, 미강, 밀기울 및 탄지강, 바이오차, 코코피트 및 피트모스를 부형제로 사용하였을 때 미생물의 성장률을 분석하였다. 고상발효는 1차와 2차로 나누어서 진행되었으며, 각 단계에서 24시간 동안 반응하였다. 1차 고상발효에는 대두박, 미강, 밀기울 및 탄지강이 사용되었으며, 2차 고상발효에는 바이오차, 코코피트 및 피트모스가 사용되었다. 1차 고상발효시 미생물의 생육 특성을 분석하기 위해서 각 부형제에 혼합미생물을 1% 주입하여 반응온도 30°C에서 시간에 따른 (0, 2, 4, 8, 12, 16, 20 및 24 h) 미생물의 생균수를 측정하였다. 미생물의 생균수가 가장 많이 증가되는 부형제를 선정하였으며, 그 부형제를 사용한 1차 고상발효 미생물제에 2차 고상 발효를 위한 부형제를 추가로 1차 고상발효제와 동일한 양을 투입하였다. 2차 고상발효시 미생물의 성장 특성을 분석하기 위해서 반응온도 30°C에서 시간에 따른 (0, 2, 4, 8, 12, 16, 20 및 24 h) 미생물의 생균수를 측정하였다. 미생물의 생균수는 각 시간에 샘플링한 미생물제를 0.1% NaCl로 추출하여 한천배지에 도말하여 측정하여 CFU/mL로 계산하였다. 또한, 고상발효시 최적 주입 seed량 (0.5, 1, 5, 10, 20 및 50%), 배양온도 (10, 20, 30, 35, 40 및 45°C), 배양시간(1차, 2차 각각 4, 8, 12, 24, 48 h), 건조온도 (30, 35, 40 및 45°C) 및 건조시간(12, 24 및 48 h)을 확립하기 위해서 각 조건을 달리하여 미생물의 생균수를 측정하였다.

(4) 고상흡착 공정 확립

혼합미생물의 고상흡착 공정을 확립하기 위해서 고상발효 시 가장 효과가 좋았던 부형제 조건을 활용하였을 때 seed량(0.5, 1, 5, 10, 20 및 50%)에 따른 미생물의 생균수를 분석하였으며, 고상발효와 고상흡착 공정의 미생물 증식 효과를 비교하였다. 미생물의 생균수 분석은

고상발효 공정 확립에서의 방법과 동일하게 하였다.

(5) 원료의 부형제 확립

혼합미생물의 공정을 개발하기 위해서 고상발효 공정을 확립하였으며, 다음 공정에 사용되는 원료의 부형제를 상기 (1)-(4)항의 결과를 종합적으로 검토하여 최적 부형제 확립 방안을 도출하였다.

(6) 깔짚 적용 미생물 시제품의 pilot test

개발된 혼합미생물제의 깔짚 소재로서의 적용 시험을 위해서 사천에 위치한 축사에 혼합미생물제를 처리한 후 깔짚 소재로서의 적합성을 평가하였다.

라) 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 생산공정 개발

(1) 탄소/질소 제어율 조절 기술 확립

Bacillus subtilis, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물의 생육에 필요한 최적의 C/N비를 선정하기 위해 기본배지에 첨가되는 최적 질소원을 0.5%로 고정한 후 최적 탄소원의 양을 다르게 하여 C/N비가 10, 20, 30, 50이 되도록 조절한 후, 앞의 방법과 동일한 조건에서 진탕배양하고 배양액의 OD₆₀₀을 조사하였다.

(2) 질소/인 제어율 조절 기술 확립

Bacillus subtilis, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물의 생육에 필요한 최적의 N/P비를 선정하기 위해 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지의 N/P비인 0.15를 기준으로 질소원을 0.5%로 고정하고 P의 양을 다르게 하여 N/P비가 0.15, 1, 2.5, 5, 10이 되도록 조절한 후, 앞의 방법과 동일한 조건에서 진탕배양하고 배양액의 OD₆₀₀을 조사하였다.

(3) 탄소/질소 제어공정의 운전기술 최종확립

상기 (1)항과 (2)항의 연구 결과들을 종합적으로 검토하여 혼합미생물 생산을 위한 탄소/질소 제어공정의 운전기술을 최종 확립하였다.

(4) 개발된 공정의 운전비용 도출

본 실험에 사용된 미생물을 대량배양하고, 이들을 고상발효 배합 깔짚 소재를 생산하기 위해 사용되는 각각의 소재들의 양과 가격을 고려하고, 생산시스템의 전력 소요량을 계상하여 최적조합 깔짚 소재 생산을 위한 운전비용을 산출하였다.

(5) 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 배양공정의 연계 운전방법 확립

축사바닥 깔짚과 혼합미생물 배양공정의 연계 운전방법 확립은 주관연구기관의 연구 결과와 본 연구진에 의해 구명된 혼합미생물 배양공정을 연계하여 바이오차 혼합깔짚 생산을 위한 연계시스템을 구성하였고, 그와 관련된 연계 운전방법을 확립하였다.

3) 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 및 원료 다양화 방안 연구

가) 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 조사

(1) 조사대상: 한우농가, 육계농가

(가) 농립어업총조사기준 상위 6개도 (전체 사육 마릿수의 70% 이상 차지)

① 한우농가: 경상북도, 전라남도, 충청남도, 전라북도, 경상남도, 경기도

② 육계농가: 전라북도, 전라남도, 충청남도, 경기도, 경상북도, 충청북도

(나) 아래 사육수를 충족하는 각 20개 농가 (가장 비중이 큼)

① 한우농가: 50마리 미만

② 육계농가: 3만마리 이상

(2) 조사기간: 2021년 4월 ~ 2021년 9월

(3) 조사항목: 규모, 비용, 사용하는 축사깔짚 재료, 사용량, 교체주기, 분뇨처리 방법, 사용 축사깔짚에 대한 의견 (장단점, 문제점 교체의견 등)

(4) 조사방법: 직접방문을 통한 현장 실태 확인 조사

나) 축사바닥 깔짚 소재 문제점 및 개선방안 도출

(1) 운영실태 조사 결과 분석에 따른 문제점을 파악하여 적절한 개선방안 도출

(2) 실행 기간: 2021년 9월 ~ 2021년 10월

다) 축사바닥 깔짚 소재 원료 수급 방법 및 다양화 방안 연구

(1) 문제점에 대해서 도출된 개선방안에 적합한 축사깔짚 소재 및 원료배합 도출

(2) 연구를 위한 실증포 운영용 깔짚 재료 소재 원료 수급 방법 및 계획 검토

(가) 바이오차, 피트, 미생물 수급량 및 수급 가능 일정 조율, 계획 설정

(3) 실행 기간: 2021년 10월 ~ 2021년 11월

나. 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발

1) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계를 위한 핵심기술 개발

가) 계사 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립

(1) 공시재료

(가) 수분조절재

본 시험에 사용된 수분조절재는 1차년도 과제 수행 시 사용하였던 톱밥, 왕겨, 피트모스 및 코코피트를 사용하였다. 톱밥의 경우 국내 목재 가공 공장으로부터 발생한 것을 이용하였으며, 피트모스 및 코코피트는 각각 유럽 및 베트남에서 생산하여 국내로 수입되는 제품을 본 과제의 참여기관인 (주)케이아그로로부터 확보하여 사용하였다. 왕겨는 경남 진주시 인근 농가로부터 확보하여 사용하였다.

(나) 바이오차

본 실험에 사용된 바이오차는 1차년도에 사용하였던 바이오차를 사용하였으며 한국남동발전 영동 에코발전본부에서 발전과정에서 발생된 것을 채취하여 사용하였다.

(다) 미생물

본 실험에 사용된 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 및 *Alcaligenes faecalis* 총 4종이었으며, *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 3 종은 본 과제의 참여기관인 흡사랑 영농조합법인에서 사용하고 있는 각 균주를 분양받아 사용하였다. *Alcaligenes faecalis* (KTCT 2678)는 생물자원센터 (KCTC)에서 분양받아 사용하였다.

(라) 계분뇨

본 실험에 사용된 계분뇨는 경상북도 성주군 수륜면 신정리에 위치한 가축분 퇴비장에서 육계분을 수거하였으며 (Fig. 2-14), 본 시험에 사용된 계분뇨는 깔짚 효과를 명확하게 검증하기 위하여 왕겨가 최대한 섞이지 않은 계분뇨를 수거하였으며, 운반의 용이성을 위하여 개별포장하여 운반하였다. 수거된 계분뇨의 화학적 특성은 Table 2-3에서 보는 바와 같다.



Fig. 2-14. 경상북도 성주군 육계분 퇴비장에서 육계분 수거 사진.

Table 2-3. 본 실험에 사용된 육계분의 물리화학적 특성

pH	EC	Water content	OM	T-N	P	K	Ca	Mg	Salt content
(1:10)	(dS/m)	-----	(%) -----	-----	-----	(mg/kg) -----	-----	-----	(%)
8.98	5.02	33.2	80.8	1.43	5655	17457	12124	3315	0.22

(2) 계사 전용 깔짚 소재 최적 수분조절재 및 혼합비율 선정

(가) 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험

단일 소재 깔짚의 수분 흡수 속도 실험은 Fig. 2-15에서 보는 바와 같이 가로 25 cm, 세로 25 cm, 높이 22.5 cm인 스티로폼 용기에서 진행하였으며, 단일 처리구 (왕겨, 톱밥, 피트모스, 코코피트, 바이오차) 5종을 3반복하여 실험하였다.

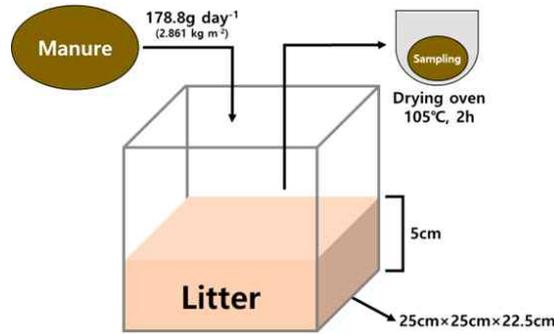


Fig. 2-15. 계분뇨의 수분 흡수 속도 시험을 위한 장치 설계도.

본 실험에서는 제작한 각 조에는 계사 깔짚 권장 높이인 5 cm가 되도록 깔짚을 깔고, 각 처리구에 단위면적당 1일 발생량에 해당하는 계분뇨 2.86kg m^{-2} (178.8g day^{-1})를 60일 동안 매일 1회씩 투입하였으며 아래의 과정을 통해 산출하였다.

육계 사육기준 : 22마리/ m^2

스티로폼 용기 면적 : 0.0625m^2

스티로폼 면적의 육계 사육 기준 : $0.0625\text{m}^2 * (22\text{마리}/\text{m}^2) = 1.375\text{마리}$

육계 1마리의 일일 분뇨 배출량 : 130 g

스티로폼 면적의 1일 발생량에 해당하는 계분뇨량 : $1.375\text{마리} * 130\text{g} = 178.75\text{g}$

실제 계사와 유사한 환경을 만들어주기 위해 계분뇨와 깔짚을 섞어준 후 하루 뒤에 샘플을 채취하여 수분 함량을 측정하였다. 수분 함량은 105°C 인 dry oven에서 2시간 건조하여 측정하였다.

수분 함량 결과를 이용하여 깔짚 소재의 수분흡수속도를 산출하기 위해 $\ln(C/C_0) = -Kt$ 의 1차 반응속도식을 이용하였다. 깔짚의 공극 내 수분흡수속도를 1차 반응으로 가정하여 $V=KC$ 로 정의 하고 정리된 아래의 식을 이용하여 수분흡수속도인 직선식의 기울기 상수(K)를 구하였다.

$$\int_{c_0}^c \frac{1}{c} dc = -K \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{c}{c_0} = -Kt$$

C_0 : 초기($t=0$) 농도

C : 나중(t 시간 후) 농도

K : 속도상수(time^{-1})

t : 반응시간 (time)

수분흡수속도 상수를 “-K”로 표현하였으며, 기울기의 양(+)의 값이 커질수록 수분흡수속도 (-K)가 빨라지는 것을 의미하여, 기울기가 0에 가까울수록 수분흡수속도(-K)가 늦다는 것을 의미한다.



Fig. 2-16. 수분흡수속도 실험 전경.

수분 흡수율 실험을 위해 육계 1마리의 7일 배출량에 해당하는 분뇨의 수분량은 아래의 과정을 통해 산출하였다.

육계 1마리당 7일 분뇨 배출량 : $130 \text{ g/마리} \times 1\text{마리} \times 7\text{일} = 910 \text{ g}$

육계분의 수분 함량 : 74.09%

육계 1마리당 7일 배출량에 해당하는 분뇨의 수분량 : $910 \text{ g} \times 0.7409 = 674.22 \text{ mL}$

각 깔짚 소재를 1 L 비커의 600 mL 눈금까지 넣고 육계 1마리의 7일 배출량에 해당하는 분뇨의 수분량인 674.22 mL을 증류수로 대체하여 주입하였다. 깔짚 소재가 증류수에 충분히 잠기도록 한 후 30분 동안 정치하고 남아있는 물을 따라내어 그 양을 측정하였다.

(나) 혼합 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험

혼합 소재 깔짚의 수분흡수속도 실험은 및 수분 흡수율 실험 방법은 상기 (가) 항의 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험 방법과 동일하며 깔짚 소재를 다르게 하였다. 본 시험에서 사용된 깔짚 소재는 피트모스 및 바이오차를 각각 8:2, 7:3 및 6:4의 부피비로 혼합한 혼합 깔짚을 사용하였으며 3반복하여 실험을 수행하였다.

(3) 최적화된 깔짚 소재의 계분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립

상기(2) 항의 단일 소재 깔짚 및 혼합 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험의 결과를 바탕으로 최적화된 깔짚 소재의 허용한계치 및 일수를 확립하였다.

(4) 계사 전용 깔짚 소재 최적 미생물제 선정

(가) 단일 및 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링

1차년도에 퇴비화 실험을 위해 제작하였던 0.565 m × 0.365 m × 0.365 m (가로 × 세로 × 높이) 인 소형 퇴비화 장치에서 단일 및 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링 시험을 수행하였으며, 실험 장치 면적에 해당하는 1일 계분뇨 투입량을 아래와 같은 방법으로 산정하였다.

실험 장치 면적 : $0.565 \text{ m} \times 0.365 \text{ m} = 0.206225 \text{ m}^2$

육계 사육 기준 : 22마리(1.5 kg/수)/ m^2

육계 1마리의 1일 분뇨 배출량 : 130 g/수

일일 분뇨 배출량(g/m^2) : $130 \text{ g/수} \times 22 \text{ 수}/\text{m}^2 = 2860 \text{ (g}/\text{m}^2)$

실험 장치 면적의 1일 계분뇨 투입량 : $2860 \text{ g}/\text{m}^2 \times 0.206225 \text{ m}^2 = 589.8 \text{ g}$

단일 및 혼합 깔짚의 처리구는 왕겨, 피트모스, 바이오차, 피트모스 및 바이오차를 8:2의 부피비로 혼합한 혼합 깔짚 총 4종을 3반복하여 실험하였으며, 실험 장치에 5 cm 높이로 깔짚을 깔아두었다. 깔짚 상태 모니터링은 계분뇨의 수분 함량을 일반적인 육계분의 수분 함량인 74.09%로 조절하여 매일 1일치의 육계분을 투입하여 혼합하고 실험 장치 내 육계분의 온도, 수분, 유기물, pH, EC, 부숙도 (발아지수)를 조사하였다. 온도 변화는 실험 장치 내부에 온도 센서를 설치하여 5분 간격으로 자동 모니터링하였다. 수분 함량은 육계분 투입 전 샘플링하여 105℃의 드라이 오븐에서 2시간 건조하여 매일 측정하였다. 유기물 함량은 회화법을 사용하여 600℃의 전기로에 2시간 가열하여 유기물 함량을 조사하였으며, 5일 간격으로 측정되었다. pH 및 EC는 퇴비 및 증류수를 1:10의 비로 하여 30분간 진탕한 후 pH meter 및 EC meter를 사용하여 분석하였으며, 5일 간격으로 모니터링 하였다. 부숙도는 5일 간격으로 모니터링 하였으며, 농촌진흥청 고시 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준 (제2021-30호)에 고지되어 있는 종자발아법에 따라 발아지수를 측정하였다.

(나) 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링

단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링 실험의 처리구는 피트모스 및 바이오차를 8:2의 부피비로 혼합한 깔짚에 미생물 4종 (*Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 및 *Alcaligenes faecalis*) 각각을 깔짚 부피의 3% 만큼 첨가하고 48시간 상온에서 발효시킨 후 제조된 4종의 깔짚을 실험 장치에 5 cm 높이로 깔고 상기 (가) 항의 단일 및 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링 방법과 동일하게 실험을 수행하였다.

(다) 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링

혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링 실험의 처리구는 본 과제의 참여기관인 흡사량 영농조합법인에서 제조한 미생물 3종 (*Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei* 및 *Saccharomyces cerevisiae*)이 첨가된 깔짚 1종과 피트모스 및 바이오차를 8:2의 부피비로 혼합한 깔짚에 미생물 4종 (*Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 및 *Alcaligenes faecalis*)이 혼합된 혼합 미생물을 깔짚 부피의 3% 만큼 첨가하고 48시간 상온에서 발효시켜 깔짚을 제조하였다. 2종의 깔짚을 실험 장치에 5 cm 높이로 깔고 상기 (가) 항의 단일 및 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링 방법과 동일하게 실험을 수행하였다.



Fig. 2-17. 계사 전용 깔짚 소재 최적 미생물제 선정 실험 전경

(5) 각 조건에서 생산된 계분뇨 퇴비의 품질특성 및 안정성 평가

(가) 계분뇨 퇴비의 품질 특성

제조된 계분뇨 퇴비의 품질 특성 평가는 상기 (4) 항의 계사 전용 깔짚 소재 최적 미생물제 선정 실험 중에 퇴비를 샘플링하여 부숙도 (발아지수), 무기성분 (K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Al 및 P)을 분석하였다. 퇴비의 품질 특성 평가는 깔짚 상태를 40일간 모니터링 할 때와 깔짚 상태 모니터링 종료 후 퇴비화 과정을 수행하며 분석 항목을 분석하였다. 부숙도 및 무기성분은 5일 간격으로 샘플링하여 분석하였으며, 부숙도는 상기 기입된 방법에 따라 분석하였으며, 무기성분은 샘플링한 퇴비를 황산:과염소산=1:1 용액을 이용해 습식 분해한 후 ICP-OES로 분석하였다.

(나) 계분뇨 퇴비의 안정성 평가

계분뇨 퇴비의 안정성 평가는 깔짚 상태를 40일간 모니터링 할 때와 깔짚 상태 모니터링 종료 후 퇴비화 과정을 수행하였으며, 상기 (4) 항의 계사 전용 깔짚 소재 최적 미생물제 선정 실험 중에 퇴비를 샘플링하여 염산불용해물, 유해물질 (As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, Ni 및 Zn), 대장균, 살모넬라, 염분, NO₃-N, PO₄-P 및 SO₄-S를 분석하였다. 염산불용해물, 유해물질, 염분, NO₃-N, PO₄-P 및 SO₄-S는 5일 간격으로 샘플링하여 분석하였으며, 대장균 및 살모넬라는 계분뇨 투입 40일 후와 깔짚 과정 모니터링 종료 후 퇴비화 과정 시작 10일 후에 샘플링하여 분석하였다. 염산불용해물, 염분, 대장균 및 살모넬라는 농촌진흥청 고시 비료의 품질검사 방법 및 시료채취기준 (제2021-30호)에 고지되어 있는 방법에 의거하여 분석하였다. 유해물질은 샘플링한 퇴비를 황산:과염소산=1:1 용액을 이용해 습식 분해한 후 ICP-OES로 분석하였으며, NO₃-N, PO₄-P 및 SO₄-S는 샘플링한 퇴비를 증류수와 1:10비로 하여 30분간 진탕한 후 No.6 여과지로 여과하여 이온크로마토그래피를 활용하여 분석하였다.

(다) 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 계사 내 악취 발생 특성 평가

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 계사 내 악취 발생 특성 평가는 상기 (4) 항의 계사 전용 깔짚 소재 최적 미생물제 선정 실험 중에 계분뇨를 투입 후 4일, 12일, 17일, 24일, 36일, 40일 후에 악취를 포집하여 분석하였으며, 포집 방법은 실험 장치를 4시간 동안 밀폐하고 악취 샘플러를 이용하여 3L의 기체를 tedlar bag에 포집하였다. 채취된 기체는 환경부고시 지정악취 물질 22종을 Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry (SIFT-MS, VOICE 2000 ULTRA, SYFT Technologies, New Zealand)를 이용하여 분석하였고, 분석된 악취 농도를 통해 악취 발생 특성을 평가하였다. 또한 악취의 성분별 기여도를 고려하기 위하여 악취 성분 각각의 발생 농도에 사람이 감지할 수 있는 최저 농도인 악취 성분별 최소감지농도 (Table 2-4)를 나누어 Odor Unit으로 환산된 값을 사용하였다.

$$\text{Odor Unit} = \text{악취 발생 농도 (nmol/mol)} / \text{악취 성분별 최소감지농도 (nmol/mol)}$$

Table 2-4. 악취 성분별 최소감지농도

Odor compounds	Concentration (nmol/mol)	Odor compounds	Concentration (nmol/mol)
Ammonia	100	Propanal	2
Trimethylamine	0.1	Butanal	0.3
Dimethyl disulfide	0.3	Pentanal	0.2
Dimethyl sulfide	0.1	Styrene	30
Hydrogen sulfide	0.5	Toluene	900
Methyl mercaptan	0.1	m-xylene	41
Propanoic acid	2	Butanone	440
Butanoic acid	0.07	Methyl isobutyl ketone	200
3-methylbutanoic acid	0.3	Butyl acetate	8
Acetaldehyde	2	Isobutyl alcohol	10

나) 우사 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립

(1) 공시재료

(가) 수분조절재

본 실험에 사용된 수분 조절재는 상기 가)항의 수분조절재와 동일한 톱밥, 피트모스 및 코코 피트를 사용하였다

(나) 바이오차

본 실험에 사용된 바이오차는 상기 가)항과 동일한 바이오차를 사용하였다.

(다) 우분뇨

본 실험에 사용된 우분뇨는 1차년도 연구과제 수행 중 우분뇨를 수집한 농가에서 수집하여 사용하였다.

(2) 우사 전용 깔짚 소재 최적 수분조절재 및 혼합비율 선정

(가) 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 시험

단일 소재 깔짚의 수분 흡수 속도 실험은 상기 가)-(2) 항에서 사용한 것과 동일한 가로 25 cm, 세로 25 cm, 높이 22.5 cm인 용기에서 진행하였으며, 단일 처리구 (톱밥, 피트모스, 코코피트, 바이오차) 4종을 3반복하여 실험하였다.

본 실험에서는 제작한 각 조에는 우사 깔짚 권장 높이인 5 cm가 되도록 깔짚을 깔고, 용적수분함량 측정을 위해 토양수분센서를 꽂고, 데이터로거로 수분함량을 기록하였다.

일반적인 우분뇨 투입량은 한육우 한 마리 권장 사육 면적인 7 m²를 기준으로 발생하는 1일 분뇨량인 13.7 kg을 기준으로 하였으며 본 실험에서는 각 처리구에 단위면적당 1일 발생량에 해당하는 우분뇨 1.96 kg m⁻²(625 cm² 기준 122.5 g day⁻¹)를 매일 1회씩 투입한 후 실제 측사와 유사한 환경을 모사하기 위해 깔짚을 섞어준 후 용적수분함량을 3일 간격으로 10분씩 측정하여 일정 수치로 안정화된 값을 기록하였다. 소재별 수분흡수특성을 파악하기 위해 75일까지 용적수분함량을 조사하였다.

수분함량 결과를 이용하여 깔짚 소재의 수분흡수속도를 산출하기 위해 상기 가)-(2) 항과 동일한 방법을 사용하였다.

(나) 혼합 깔짚의 수분흡수속도 시험

혼합 소재 깔짚의 수분흡수속도 실험은 및 수분 흡수율 실험 방법은 상기 (가)항의 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험 방법과 동일하며 깔짚 소재를 다르게 하였다. 본 시험에서 사용된 깔짚 소재는 피트모스 및 바이오차를 각각 8:2, 및 2:8의 부피비로 혼합한 혼합 깔짚을 사용하였으며 3반복하여 실험을 수행하였다.

(3) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립

상기 (2) 항의 단일 소재 깔짚 및 혼합 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험의 결과를 바탕으로 최적화된 깔짚 소재의 허용한계치 및 일수를 확립하였다.

(4) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 악취 저감 효율 평가

(가) 단일 소재 깔짚의 악취 저감 효율 평가

우분뇨에서 지정악취 22종의 발생 특성과 깔짚 소재별 악취 저감 효율을 평가하기 위해 우분뇨, 우분뇨 + 바이오차, 우분뇨 + 피트모스, 우분뇨 + 코코피트 및 우분뇨 + 톱밥의 총 5개 처리구를 3반복하여 총 15개 악취 실험장치 (가로 56.5 cm × 세로 36.5 cm × 높이 36.5 cm)를 설치하였다. 각 처리구에서 우분뇨대 깔짚 비율 (질량비)을 10:1되게 혼합하여 총 시료 50 L를 각 장치에 투입하였다. 우분뇨대 깔짚 비율은 농림수산식품부에서 권장하는 우사 깔짚 높이인 5 cm와 단위 면적당 일일 우분뇨 발생량 (1.96 kg/m²)을 고려하여 축사환경에서 60일간 투입되는 양으로 산정하였다. 우분뇨만 들어간 처리구에도 시료의 균질화를 위하여 혼합과정을 수행하였다.

악취 시료는 각 악취실험 장치 상부에 연결된 관을 악취 샘플러에 연결되도록 하여 채취하였다. 악취가스 시료는 우분뇨 단독처리와 우분뇨와 깔짚 혼합 처리 모두 실험 시작 후 악취와 깔짚이 충분히 혼합될 수 있도록 실온에서 24시간 동안 축사환경과 동일한 조건으로 유지한 후 악취채취를 위해 4시간 동안 밀폐하여 악취 샘플러를 이용하여 3 L의 기체를 채취한 후 분석을 수행하였다.

(나) 혼합 깔짚의 약취 저감 효율 평가

혼합 깔짚은 피트모스와 바이오차를 각각 8:2 및 2:8의 비로 혼합하여 제조한 PM:BC(8:2) 및 PM:BC(2:8) 깔짚을 사용하였으며, 평가 방법은 상기 (가) 항과 동일하게 수행하였다.

다) 개발된 깔짚 소재 적용 축사내 부숙화 단계 검증(1단계 퇴비화)

(1) 조건 실험이 가능한 축산농가 선정

개발된 깔짚을 적용하는 구간과 기존에 깔짚으로 사용하던 톱밥 및 왕겨를 사용하는 구간 총 2가지의 상태를 비교할 수 있는 한우 농가 및 오리 농가를 실험 장소로 선정하였다.

(2) 개발된 깔짚을 적용한 후 입식 및 사육

한 구간에 개발된 깔짚을 우사 및 계사에 5~10 cm의 두께로 적용하여 한우 및 오리를 입식 및 사육을 진행하고, 다른 한 구간에 한우사의 경우 톱밥, 계사의 경우 왕겨를 적용하여 입식 및 사육을 수행하였다.

(3) 개발된 깔짚 적용 축사 모니터링

개발된 깔짚 적용 축사 모니터링 항목은 축사 내부 및 퇴비사의 수분, 유기물, 염분, 염산불용해물, T-N, 무기성분 (K, Ca, Mg 및 Na), 유해물질 (As, Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, Cr 및 Hg), 부숙도 (종자발아법), NO₃-N, PO₄-P, SO₄-S, 미생물 군집 분포 및 약취 발생량을 분석하였다. 수분, 유기물, 염분, 염산불용해물, 무기성분, 유해물질, 부숙도, NO₃-N, PO₄-P 및 SO₄-S의 분석은 상기 분석 방법과 동일하게 분석하였다. 미생물 군집 분포는 샘플링된 퇴비를 미생물 군집 분석 (Microbiome taxonomic profiling)을 의뢰하여 확인하였으며, 약취 발생량은 축사 및 퇴비사 내의 우분뇨가 쌓여있는 곳에서 30 cm 위의 공기를 약취 샘플러를 이용하여 3 L 포집한 후 분석하였다.

라) 가축분뇨 혼합된 깔짚의 축사와 퇴비사 연계방안 확립

(1) 상기 선행연구 결과를 적용하여 축사에서 퇴비사로 가축분뇨 혼합된 깔짚의 이동 시기 결정

축사에서 퇴비사로의 가축분뇨가 혼합된 깔짚의 이동 시기 결정은 축사 내 축산분뇨의 수분 함량 및 품질 특성을 조사하여 적절한 시기를 선정하였다.

(2) 축사에서 퇴비사 적용시 최적환경 조건 구축

(가) 과도한 수분누적시 추가적인 수분조절재 공급

축사에서 퇴비사로 축산분뇨가 혼합된 깔짚을 이동할 때, 축산분뇨의 수분함량을 고려하여 축산분뇨 부피의 0~10%의 톱밥 및 개발된 깔짚을 수분조절재로써 투입하고 퇴비화 과정을 모니터링하였다.

(나) 추가적인 산소공급 필요시 송풍 라인 구축

퇴비사에서 퇴비화 과정 진행 시 온도가 빠르게 상승하지 않을 경우, 퇴비 더미 내부에 미세한 구멍이 뚫린 용기를 넣고 에어펌프를 이용하여 공기를 주입하며 퇴비화 과정을 촉진하였다.

(3) 고품질 퇴비 생산을 위한 퇴비사내 퇴비더미 높이 결정

퇴비사에서 퇴비더미 면적을 2 m × 2 m (가로 × 세로)로 고정하고 높이를 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m로 달리하여 퇴비화 기간에 따른 퇴비더미 높이별 퇴비 품질, 온실가스 발생량, 악취 발생량, 침출수 및 유해물질을 종합적으로 모니터링하여 퇴비더미 높이를 결정하였다.

마) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 환경위해성 평가(2단계 퇴비화)

(1) 시험처리 : 일반적 깔짚 소재 적용 및 본 연구에서 개발된 깔짚 소재 적용

(2) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 용출성분 및 침출수 평가

(가) 부숙시기별 용출 성분 및 침출수 분석

퇴비화 과정 중에 발생하는 용출수 및 침출수를 채취하여 NO₃-N, PO₄-P, SO₄-S, NH₄-N 및 중금속을 분석하고자 하였다. NO₃-N, PO₄-P 및 SO₄-S의 분석은 이온크로마토그래피를 이용하여 분석하였고, NH₄-N은 인도페놀법을 이용하여 분석하였다.

(3) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 배출되는 온실가스 분석

(가) 부숙시기별 온실가스 배출특성

퇴비화 과정 중 퇴비더미 상단에 챔버를 설치하여 1시간 동안 기체를 포집 한 후 주사기에 3-way cock를 장착한 주사기를 이용해 기체를 채취하고 가스 크로마토그래피를 이용하여 CO₂, CH₄ 및 N₂O를 분석하며, 축산분뇨가 혼합된 깔짚이 퇴비사로 이동 후 5, 10, 20, 30, 40 및 50일에 샘플링하여 분석하였다.

(4) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 배출되는 악취성분 분석

(가) 부숙시기별 악취성분 배출 특성

부숙 시기별 악취 성분 배출 특성은 축산분뇨가 혼합된 깔짚이 퇴비사로 이동한 후 5, 10, 20, 30, 40 및 50일에 퇴비사 내 퇴비더미의 상단부에서 30 cm 위의 공기를 악취 샘플러를 이용하여 3 L 포집한 후 분석하고자 하였으며, 분석 항목은 상기 (5) 항의 각 조건에서 생산된 계분뇨 퇴비의 품질특성 및 안정성 평가에 기술된 내용과 동일한 악취 성분을 분석하였다.

(5) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 질소 손실을 평가

(가) 부숙시기별 질소 함량 및 중량 분석

부숙 시기별 악취 성분 배출 특성은 축산분뇨가 혼합된 깔짚이 퇴비사로 이동한 후 5, 10, 20, 30, 40 및 50일에 퇴비사 내 퇴비더미의 퇴비를 샘플링하여 T-N, NO₃-N, NH₄-N을 분석하였다.

바) 축사바닥 깔짚 소재 적용 친환경 가축분뇨 퇴비화 시스템 개발

(1) 상기 2-나-1) 항 중 기준을 초과하는 물질에 대한 저감 방안 수립

상기 1) 항 중 기준을 초과하는 물질이 있을 경우 깔짚 제조 공정 수정 및 깔짚 혼합 비율 수정 등 다양한 방안을 모색하여 기준 초과 물질에 대한 저감 방안을 수립하였다.

(2) 상기 2-나-1) 항 중 기준을 초과하는 물질을 저감하기 위한 시스템 변경

상기 1) 항 중 기준을 초과하는 물질을 저감하기 위해 축사 및 퇴비사 내의 구조 및 관리 방법을 시스템적으로 변경할 수 있는 방안을 모색하여 기준 초과 물질에 대한 저감 방안을 수립하였다.

(3) 고기능성 및 고품질 친환경 퇴비생산을 위한 깔짚 소재 보완 및 퇴비화 시스템 개발
고기능성 및 고품질 친환경 퇴비생산을 위한 깔짚 소재 보완 및 퇴비화 시스템 개발은 퇴비화 과정에서 생산되는 퇴비의 품질을 조사한 후 고품질 퇴비가 생산되지 않았을 경우 깔짚 소재의 제조 방법 및 퇴비사의 시스템을 수정하여 품질을 향상시킬 방안을 모색하였다.

2) 축사바닥 깔짚 우사 및 계사용 깔짚 소재 생산, 제조공정 개발 및 표준화 기술 개발

가) 우사 및 계사 깔짚 소재 제조공정 및 대량생산 공정 개발

(1) 깔짚 소재의 이화학적 특성분석

본 연구에서 사용한 깔짚 소재인 쌀겨의 이화학적 특성은 pH, EC, bulk density, 수분, 탄소, 질소, C/N 비 및 무기성분 (P, K, Mg, Ca, Na, Zn, As, Cu, B, Ni, Pb, Cd 및 Cr)을 분석하였다. pH 및 EC는 쌀겨와 증류수를 1:10의 비로 하여 30분간 진탕한 후 각각 pH meter 및 EC meter로 분석하였다. bulk density는 100 cm³ 부피의 용기에 쌀겨를 가득 채우고 무게를 측정하여 산정하였다. 수분 함량은 105°C의 드라이 오븐에 2시간 건조하여 측정하였으며, 탄소 함량은 회화법을 사용하여 600°C의 전기로에 2시간 회화하여 유기물 함량을 측정한 후 탄소 함량으로 전환하였다. 질소 함량은 쌀겨를 황산:과염소산=1:1의 분해액을 이용해 습식 분해한 후 Kjeldahl 분석법으로 분석하였으며, C/N 비는 탄소 함량을 질소 함량으로 나누어 산정하였다. 무기성분은 쌀겨를 황산:과염소산=1:1의 분해액을 이용해 습식 분해한 후 ICP-OES를 이용해 측정하였다.

(2) 미생물 종류별 미생물+쌀겨 공정 확립

본 실험에서 미생물 종류별 쌀겨 투입비율에 의한 생육 특성을 분석하기 위해, 사용된 공시 미생물은 축사 깔짚의 부숙화 효율 증진을 위한 미생물로 유기물 분해 능력이 우수하고 악취 저감에 효과적인 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일 미생물을 사용하였으며, 각 미생물은 시험 전까지 4°C 냉장 보관하여 사용하였다. 각 미생물을 배양하기 위해 사용된 배지는 탄소원이 존재하지 않는 MSM 배지 (Minimal salt Medium; Na₂HPO₄ 25.6 g/L, KH₂PO₄ 6 g/L, NaCl 1 g/L, NH₄Cl 2 g/L)를 사용하였다. 멸균된 MSM 배지 150 mL에 쌀겨를 0, 0.5, 1, 1.5, 2%로 다르게 첨가한 후, 미생물이 포함된 배양액을 1 mL 접종하였다. 30°C, 160 rpm의 조건으로 48시간 진탕배양하면서 일정시간 간격으로 배양액 1 mL을 채취한 후 UV spectrophotometer를 이용하여 균탁도를 측정하였다.

본 실험에 사용된 미생물의 배양을 위한 쌀겨의 최적 비율을 선정하기 위해 쌀겨 배지 150 mL을 고압멸균하였다. 멸균된 배지에 미생물을 12:1, 9:1, 6:1 (v/v)로 다르게 접종한 후, 배지의 전체 수분함량을 맞추어주기 위해 0.05M phosphate buffer (pH 7)를 첨가하여 쌀겨배지의 수분함량을 30%로 동일하게 맞추었다. 30°C, 24시간 동안 정지 배양을 한 후 1g을 채취하였으며, 9 mL의 증류수를 첨가하고 10분 동안 160 rpm의 조건으로 진탕하였다. 그 후 진탕배양액을 LB배지에 도말하여 생균수 (CFU/g)를 조사하였다.

(3) 우사 및 계사 깔짚 소재 최적 혼합비율 선정

본 실험에 사용된 미생물의 접종방법이 생육에 미치는 영향을 평가하기 위하여 seed 배양과 spray 배양 시 생육 차이를 비교하였다. seed 배양은 멸균된 쌀겨배지 150 mL에 12:1로 접종된 미생물을 1일 동안 배양하고 쌀겨에 배양된 미생물을 깔짚 소재에 3% 투입하였고, spray 배양은 3% 미생물 배양액을 깔짚 소재에 투입하였다. 앞의 방법과 동일한 조건에서 정지배양하고 배양액의 생균수 (CFU/g)를 조사하였다.

본 실험에 사용된 미생물의 접종비율이 생육에 미치는 영향을 평가하기 위하여 각 미생물을 깔짚 소재에 1.5, 3, 6% 접종한 후, 앞의 방법과 동일한 조건에서 정치배양하고 배양액의 생균수 (CFU/g)를 조사하였다.

본 실험에서 미생물 종류별 깔짚 소재의 최적 혼합비율을 선정하기 위해서, 왕겨와 바이오차, 피트모스, 피트모스:바이오차 (8:2, 7:3, 6:4) 등 6종의 깔짚 소재를 사용하여 미생물의 생육 특성을 분석하였다. 최적 접종비율로 선정된 3%의 미생물을 깔짚 소재에 접종한 후, 앞의 방법과 동일한 조건에서 정치배양하고 배양액의 생균수 (CFU/g)를 조사하였다.

깔짚의 수분흡수속도와 깔짚교체시기 기준에서 깔짚의 최적 혼합비율을 선정하기 위해서 피트모스:바이오차 = 8:2, 7:3, 6:4 비율로 달리하여 우분을 사용하였을 때, 계분을 사용하였을 때 수분흡수속도 및 깔짚 교체 시기를 분석하였다. 실험을 수행한 조의 크기는 가로 25 cm, 세로 25 cm, 높이 25 cm로 용량이 15.625 cm³ 이 되도록 하였다. 제조된 각 조에서 우사와 계사 깔짚의 높이는 농림수산식품부에서 제시한 권장 높이인 5 cm로 하였고, 용적수분함량 측정을 위해서 토양수분 센서 (5TE, Decagon device, USA)를 꽂고, 데이터로거 센서 (ZL6, C&Y, KOR)로 수분함량을 기록하였다. 일반적인 우분뇨 투입량은 한육우 한 마리 권장 사육면적인 7 m²을 기준으로 발생하는 1일 분뇨량인 13.7 kg을 기준으로 하였으며, 본 실험에서는 각 처리구에 단위면적당 1일 발생량에 해당하는 우분뇨 1.96 kg m⁻²를 매일 1회씩 투입한 후 실제 축사와 유사한 환경을 모사하기 위해서 깔짚을 섞어준 후 용적수분함량을 3일 간격으로 10분씩 측정하여 일정 수치로 안정화된 값을 기록하였다. 계분의 투입량은 육계사육기준 22 마리/m², 육계 1마리당 1일 분뇨배출량 130 g 을 기준으로 계산하여 2.86 kg m⁻²을 매일 1회씩 투입하였다. 소재별 수분흡수특성을 파악하기 위해 우분뇨를 투입하였을 때는 70일, 계분뇨를 투입하였을 때는 60일까지 용적수분함량을 조사하였다. 이들 결과를 이용하여 깔짚 소재의 수분흡수속도를 산출하기 위해 1차 반응속도식을 이용하여 분석하였다. 깔짚의 공극 내 수분 흡수속도를 1차 반응으로 가정하여 $C = KC$ 로 정의하여 이를 아래 식을 이용하여 수분흡수속도인 직선식의 기울기상수 (K)를 구하였다. 본 반응속도식에 의해 기울기의 양의 값이 커질수록 수분흡수속도가 빨라지는 것을 의미하며, 기울기가 0에 가까울수록 수분흡수속도가 늦다는 것을 의미한다.

$$\int_{C_0}^C \frac{1}{c} dc = -K \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{c}{C_0} = -Kt$$

C_0 : 초기(t=0) 농도

C : 나중(t시간 후) 농도

K : 속도상수(time⁻¹)

t : 반응시간 (time)

수분흡수 속도 기울기 상수 산출식

(4) 우사 및 계사 깔짚 이용기술 개발 (사용량, 교체 시기 등)

본 실험에서 우사 및 계사의 깔짚 이용기술을 사용량, 교체 시기를 고려하여 개발하기 위해서 깔짚의 사용량에 따른 수분흡수속도와 깔짚 교체 시기를 조사하였다. 깔짚의 사용량은 두께를 달리하여 차이를 두었으며 깔짚의 두께는 2.5, 5, 7.5 및 10 cm로 하였다. 우분과 계분 모두 사용하여 실험을 수행하였으며, 깔짚의 두께를 제외한 모든 실험방법은 우사 및 계사 깔

짚소재 최적 혼합비율 선정을 위해 짚짚 수분흡수 속도와 짚짚 교체 주기 측면에서 분석한 실험방법과 동일하게 수행하였다.

(5) 우사 및 계사 짚짚 이용기술을 고려한 제조공정 최적화 및 표준화 공정 개발

본 실험에 사용된 각 미생물을 배양하기 위해 사용된 배지는 Table 2-5와 같이 멸균된 배지 (1% 탄소원, 0.5% 질소원, Na_2HPO_4 6 g/L, KH_2PO_4 3 g/L, NaCl 0.5 g/L, MgSO_4 0.24 g/L, CaCl_2 0.01 g/L) 150 mL에 미생물 1 mL을 접종한 후 30°C, 160 rpm에서 진탕배양 하였으며 (Fig. 2-18), 미생물 생육은 분광광도계를 이용하여 600 nm에서 균탁도를 측정하였다.

Table 2-5. 배지 기본 성분

Carbon source	Nitrogen source	Na_2HPO_4	KH_2PO_4	NaCl	MgSO_4	CaCl_2
1%	0.5%	6 g/L	3 g/L	0.5 g/L	0.24 g/L	0.01 g/L

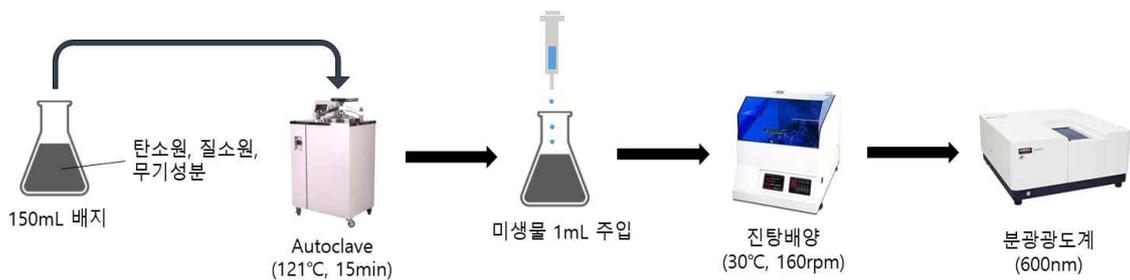


Fig. 2-18. 미생물 배양 방법.

본 실험에 사용된 미생물의 생육에 필요한 최적의 질소원을 선정하기 위해 기본배지 (Na_2HPO_4 6 g/L, KH_2PO_4 3 g/L, NaCl 0.5 g/L, MgSO_4 0.24 g/L, CaCl_2 0.01 g/L)에 탄소원인 Glucose를 1% 첨가하고 Peptone, Yeast extract, Urea, NH_4Cl 등 4가지 질소원을 각각 0.5%씩 첨가하여 각각 150 mL씩 제조한 후 고압멸균하였다. 고압멸균한 후 미생물이 포함된 배양액을 1 mL 접종하고, 30°C, 160 rpm의 조건으로 48시간 진탕배양하면서 일정시간 간격으로 배양액 1 mL을 채취하여 균탁도를 측정하였다.

본 실험에 사용된 미생물의 생육에 탄소원이 미치는 영향을 평가하기 위하여 최적 질소원으로 선정된 Yeast extract 0.5%가 첨가된 기본배지에 Sucrose, Lactose, Acetate, Citrate, Glucose 등 5가지 탄소원을 각각 1%씩 첨가하고 앞의 방법과 동일한 조건에서 진탕배양하고 배양액의 균탁도를 조사하였다.

미생물 종류별 생육에 필요한 필수 무기성분을 선정하기 위해 최적 탄소원으로 선정된 Sucrose 1%와 최적 질소원으로 선정된 Yeast extract 0.5%가 첨가된 기본배지에 Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 등 4종의 무기성분을 각각 하나씩 제외하여 제조한 후 앞의 방법과 동일한 조건에서 진탕배양하고 배양액의 균탁도를 조사하였다.

본 실험에 사용된 3종의 미생물의 생육에 필요한 최적 온도를 선정하기 위해 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지에 미생물을 접종한 후, 5, 20, 30, 35°C의 온도조건에서 160 rpm으로 진탕배양한 후 48시간 동안 일정 시간 간격으로 균탁도를 측정하였다.

미생물의 생육에 필요한 최적의 교반속도를 선정하기 위해 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지에 미생물을 접종한 후, 앞의 방법과 동일한 조건에서 60, 160 및 230 rpm으로 진탕배양하고 배양액의 균탁도를 조사하였다.

미생물 배양시간에 따른 생육 차이를 확인하기 위해 최적 탄소원과 질소원이 각 1%와 0.5% 첨가된 기본배지에 미생물을 접종한 후, 30℃에서 160 rpm, 168시간 진탕배양하면서 일정시간 간격으로 배양액을 채취하여 균탁도를 측정하였다. 앞의 방법과 동일한 조건에서 60, 160 및 230 rpm으로 진탕배양하고 배양액의 균탁도를 조사하였다.

위의 방법으로 선정된 최적의 미생물 배양 조건에서 미생물을 배양하고, 2차년도 연구에서 최적 깔짚 비율로 선정된 피트모스:바이오차 = 8:2 소재를 사용하여서 2차 발효를 하였을 때 발효효율을 평가하고자 하였다. 따라서, 바이오차:코코피트:피트모스 = 1:1:3 및 피트모스:바이오차 = 8:2 비율에서 미생물을 3%가 되게 접종을 한 후에 24시간 동안 정치 배양을 한 후 1 g을 채취하였으며, 9 mL의 증류수를 첨가하고 10분 동안 160 rpm의 조건으로 진탕하였다. 그 후 진탕배양액을 LB배지에 도말하여 생균수 (CFU/g)를 조사하였다. 또한, 최적 조건에서 제조된 미생물이 함유된 깔짚 소재의 최대 보관기간을 설정하기 위해서 최종 제조된 깔짚을 한 달에 한 번씩 샘플링하여 위와 동일한 방법으로 미생물의 생균수를 측정하였다.

나) 혼합미생물 첨가 우사 및 계사 깔짚 소재 시제품 개발

(1) 미생물 (쌀겨) + 왕겨 or 톱밥 발효깔개 개발

(가) 미생물 (쌀겨) + 왕겨 or 톱밥 발효깔개 시제품 생산

미생물이 혼입된 쌀겨와 왕겨 및 톱밥이 혼합된 발효깔개 시제품을 생산하기 위해서 쌀겨와 미생물의 최적 혼합비율인 12:1로 혼합하였으며, 쌀겨와 왕겨, 쌀겨와 톱밥은 각각 1:1 비율로 혼합하였다.

(나) 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화

미생물이 혼입된 쌀겨와 왕겨 및 톱밥을 혼합하여 실증시험을 위한 제품을 생산하고 공정을 최적화 하기 위해서 이전의 실험에서 밝혀진 최적의 조건에서 공정을 확립하였다.

(2) 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효깔개 시제품 개발

(가) 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효깔개 시제품 생산

미생물이 포함되어있는 쌀겨와 바이오차를 혼합한 발효깔개 시제품을 제조하기 위해서 쌀겨와 미생물은 위의 실험 조건과 동일하게 12:1로 혼합하였으며, 쌀겨와 바이오차의 혼합비율은 1:1로 하여 제조하였다.

(나) 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화

쌀겨와 바이오차를 혼합한 발효깔개를 실증시험을 위한 제품으로 생산하고 공정을 최적화하기 위해서 혼합조건, 발효 및 건조를 위한 최적 조건을 활용하여서 공정을 확립하였고, 최종 제품을 제조하고자 하였다.

(3) 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효깔개 시제품 개발

(가) 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효깔개 시제품 생산

2차년도 연구에서 깔짚의 소재로 가장 효과가 좋았던 바이오차와 피트모스를 혼합한 것과 미생물이 함유된 쌀겨를 활용하여서 발효깔개 시제품을 생산하기 위해서 미생물이 혼입된 쌀겨:바이오차:피트모스의 혼합비율을 1:2:8로 하였다.

(나) 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화

본 연구에서 쌀겨와 바이오차 및 피트모스를 혼합한 발효깔개를 실증시험을 위해 제품으로 대량생산하기 위한 공정을 최적화하기 위해서 최적 혼합비율로 제조한 깔개를 균질하게 혼합하고, 발효 및 건조를 하여 최종 제품으로 생산하는 공정을 확립하고자 하였다.

(4) 미생물(쌀겨) + 피트 발효깔개 시제품 개발

(가) 미생물(쌀겨) + 피트 발효깔개 시제품 생산

단일 깔짚 소재 중 가장 미생물의 생육이 좋지 않았던 피트모스를 활용하여 발효깔개를 제조하기 위해서 미생물이 혼입된 쌀겨를 활용하고자 하였고, 쌀겨와 피트모스의 혼합비율을 1:1로 하여 미생물 쌀겨 + 피트모스 발효깔개 제품을 생산하였다.

(나) 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화

피트모스와 미생물 혼입 쌀겨를 혼합한 발효깔개를 실증시험용 제품을 생산하고 공정을 최적화 하기 위해서 쌀겨와 피트모스를 1:1 비율로 혼합하고, 다른 발효깔개의 공정화 방법과 동일한 온도 및 시간에서 발효, 건조 과정을 적용하였다.

다) 3톤 용량의 축사바닥 깔짚 소재 생산시스템 운영

(1) 우사 및 계사 맞춤형 발효깔개 생산시스템 확립 및 제품생산

(가) 품질관리방법 확립

개발된 깔짚의 품질관리방법은 원료별 품질관리방법 및 깔짚 생산 후 품질관리방법으로 분류하여 원산지, 건조방법, 품질 평가 기준을 확립하였다.

(나) 경제성 분석

톱밥, 왕겨 및 개발된 깔짚의 시장 단가를 비교하여 경제성 분석을 수행하였다.

3) 축사바닥 깔짚 소재의 우사 및 계사 실증포 운영

가) 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 우사 적용 실증포 운영

(1) 실증포 운영대상: 기본적으로 운영실태 조사에 참여한 농가 중 선정

(가) 한우농가 농립어업총조사기준 상위 6개도 (전체 사육마릿수의 70% 이상 차지) 내 한우농가 : 경상북도, 전라남도, 충청남도, 전라북도, 경상남도, 경기도

(나) 아래 사육수를 충족하는 각 2개 농가 (한우농가: 50마리 미만)

(2) 실증포 운영기간 : 2022년 1월 ~ 2022년 12월 (1년)

(3) 운영방법

(가) 농가별 2개 축사

(나) 실험군 (바이오차, 피트 + 미생물)과 대조군 (톱밥 등 기준 농가 사용 깔짚) 구성

(다) 우사는 10 cm 두께, 계사는 5 cm 두께로 배포

(라) 실험계획법에 따라 설정한 기준으로 샘플링하여 검사

(마) 필요시 현장 의견 반영

나) 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 계사 적용 실증포 운영

(1) 실증포 운영대상: 기본적으로 운영실태 조사에 참여한 농가 중 선정

(가) 육계농가 농립어업총조사기준 상위 6개도 (전체 사육마릿수의 70% 이상 차지) 내 육계농가 : 전라북도, 전라남도, 충청남도, 경기도, 경상북도, 충청북도

(나) 아래 사육수를 총적하는 각 2개 농가 (육계농가: 30,000마리 이상)

(2) 실증포 운영기간 : 2022년 1월 ~ 2022년 12월 (1년)

(3) 운영방법

(가) 농가별 2개 축사

(나) 실험군 (바이오차, 피트 + 미생물)과 대조군 (왕겨 등 기존 농가 사용 깔짚) 구성

(다) 우사는 10 cm 두께, 계사는 5 cm 두께로 배포

(라) 실험계획법에 따라 설정한 기준으로 샘플링하여 검사

(마) 필요시 현장 의견 반영

다) 사용된 축사바닥 깔짚으로 제조된 퇴비의 농작물별 실증시범포 운영

(1) 시범포 운영 대상

(가) 축사깔짚 실증포를 운영한 농가 반경 50 km 이내 농가

(나) 축사깔짚 실증포를 운영한 각 농가 지역의 시설특수작물

(2) 운영방법

- 대조군으로 시범포 운영농가의 기존 퇴비사용 방법을 동일하게 적용하고 실험군으로 축사깔짚으로 제조된 퇴비를 동일한 사용방법으로 투입하여 농작물 수량, 품질 등 검토, 토양의 이화학적 검토

(3) 운영기간 : 2022년 1월 ~ 2022년 12월

4) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발

가) 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개요

나) 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 평가

(1) 왕겨 깔짚 사용 전과정 평가

깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간의 전과정 평가를 위해 0.565 m × 0.365 m × 0.365 m (가로 × 세로 × 높이) 인 장치에서 시험을 수행하였다 (Fig. 2-19~20). 깔짚 사용 기간 평가를 위해 시험 장치에 왕겨 깔짚을 5 cm 깔고 매일 589.8 g의 계분뇨를 투입하며 수분함량 변화를 매일 측정하였으며, 수분함량이 포화되는 시점에 퇴비화를 수행하였다. 깔짚 사용 기간 중 악취 발생량을 측정하여 계분뇨의 악취 발생량 대비 왕겨 깔짚의 악취 저감 효율을 평가하였다. 퇴비화 과정을 평가하기 위해 시험 장치의 적정 공기 공급 유량인 8 L/min (150 L/min/m³)로 공기를 주입하며 퇴비화를 수행하였으며 퇴비화 과정 중에 수분함량 및 발아지수 변화를 측정하였다.

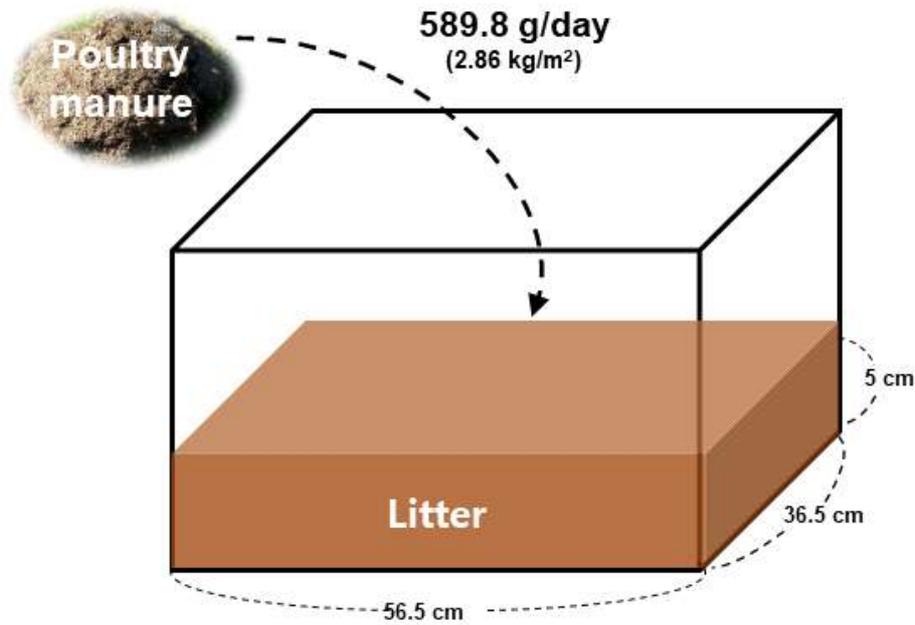


Fig. 2-19. 깔짚 사용 기간 모니터링 장치.

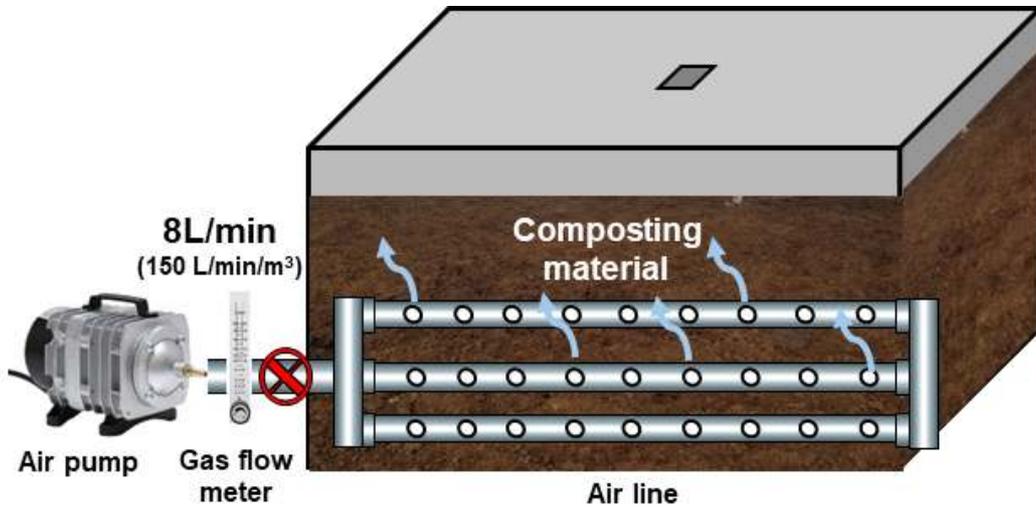


Fig. 2-20. 퇴비화 기간 모니터링 장치.

(2) 혼합 깔짚 사용 전과정 평가

깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간의 전과정 평가는 상기 (1) 항과 동일한 방법으로 수행하였으며, 혼합 깔짚은 피트모스와 바이오차를 각각 8:2 및 2:8의 비로 혼합한 PM:BC(8:2) 및 PM:BC(2:8) 깔짚을 활용하였다.

(3) 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 평가 적요

상기 (1), (2) 항의 결과를 통해 혼합 깔짚의 깔짚 교체 주기, 약취 저감, 부숙도에 대해 평가하였다. 미생물 군집 분포는 샘플링된 시료를 미생물 군집 분석 (Microbiome taxonomic profiling)을 의뢰하여 확인하였다.

다. 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재의 실용화 및 산업화

1) 개발된 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 효과 검증

가) 축사바닥 깔짚 소재 특성 및 안정성 시험

(1) 최적시스템에서 제조된 깔짚 소재의 특성

(가) 최적시스템에서 제조된 깔짚의 이화학적 특성

최적시스템에서 제조된 깔짚은 피트모스와 바이오차가 8:2의 부피비로 혼합된 깔짚으로 깔짚에 대한 화학적 특성으로는 EC, pH, OM, T-N, P₂O₅, K, Ca, Mg, Na를 분석하였으며, 물리적 특성으로는 수분함량, 수분흡수율, 용적밀도, 유효입자크기를 분석하였다.

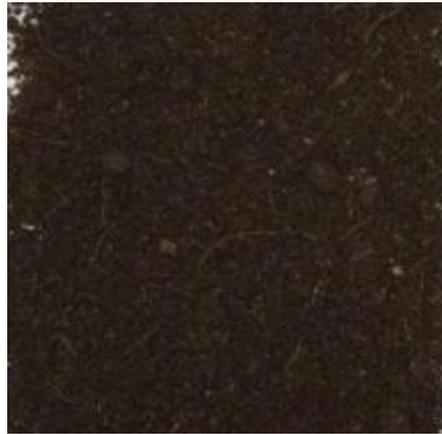


Fig. 2-21 최적시스템에서 제조된 깔짚

(2) 개발된 깔짚 소재의 안정성 평가

(가) 육안관찰

우사 및 계사에서 깔짚을 축사바닥에 깔고 소 및 닭의 이동, 분뇨 배출 패턴 등을 주기적으로 육안으로 관찰하여 깔짚이 가축의 거동에 주는 영향을 평가하였다.

(나) 깔짚 소재 자체의 안정성

농촌진흥청 고시 비료 공정규격 설정에 가축분퇴비의 유해성분으로 설정되어있는 항목인 As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn에 대하여 개발된 깔짚 소재의 성분 분석을 수행하였으며, 공정규격의 기준에 따라 안정성을 평가하였다.

나) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템 효율 평가

(1) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템에서 퇴비생산 수율 평가

축사-퇴비사 연계시스템에서 축사에서 깔짚 사용 후 퇴비사로 이동한 후 퇴비 생산 수율을 평가하였다.

(2) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템에서 생산된 퇴비의 품질특성

축사-퇴비사 연계시스템에서 생산된 퇴비의 품질 특성을 평가하기 위해 퇴비의 이화학적 특성, 부숙도 및 퇴비공정규격 부합도를 확인하였다.

(3) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 위해 물질 저감 효율 평가

축사-퇴비사 연계시스템에서 위해 물질 저감 효율을 평가하기 위해 악취 저감 효율을 확인하였다.

다) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 비해시험

(1) 우분 퇴비의 비해시험

(가) 톱밥 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험

톱밥 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험을 위한 작물은 고추 (큰열), 무 (서동), 배추 (하이스타), 상추 (그린줄기) 및 완두 (청진주) 5종의 작물에 대해 수행하였으며, 처리구는 무처리구, 기준량구 (2000kg/10a), 2배량구 (4000kg/10a)로 두어 유작물에 대한 비해 유무를 평가하였다. 기준량구의 설정은 배추 재배 시 퇴비의 추천시비량을 기준으로 하였다. 퇴비는 정식 전 토양 혼합처리하였으며, 정식 7, 14, 21일 후 외관상 나타나는 비해 유무를 달관조사하였다. 시험은 국립농산물품질관리원 고시 제2020-20호 (2020.12.08.) ‘유기농업자재 공시기준’ 및 농촌진흥청 고시 제2022-28호 (2022.09.30.) ‘비료의 품질검사방법 및 시료채취기준’에 준하여 수행되었다.

Table 2-6. 시험물질 처리정보

시험물질 (우분퇴비1)	비 료 피 해 시 험		처리량 (횟수)
	처리구	시험물질 처리일	
	무처리구	-	-
	기준량구	2023.11.25.	2,000kg/10a (정식 3일 전 1회)
	2배량구	2023.11.25.	4,000kg/10a (정식 3일 전 1회)

시험작물의 유식물은 친환경농업센터 육묘실에서 50공 모종트레이 (530 × 260 × 40 mm)를 이용하여 자체육묘 하였으며, 시험물질 처리 전 시험토양을 혼합하였다. 시험작물 (고추, 무, 배추, 상추, 완두) 정식 3일 전 기준량 (2,000kg/10a), 2배량 (4,000kg/10a)을 토양혼화 처리하였다.

시험구 규모 (또는 주수) 및 배치법은 처리구 당 5포트 (1포트 1주) × 3반복 (임의배치법)하였으며, 포트규격은 지름 100 mm, 높이 90 mm (고추, 무, 배추, 상추, 완두)로 유리온실에서 재배하였다.

시설관리는 냉·난방기 및 자동 개폐식 차광망, 자동 계폐식 보온망이 설치된 유리온실에서 1일 2회 이상 온·습도를 확인하여 작물을 재배하였으며(시험시 온실 내 재배환경 - 온도 : 19 ~ 22℃, 습도 : 29 ~ 64%), 관수는 계절 및 온·습도에 따라 1일 1회에서 2회 분수호스로 관수하였다. 시험과정 중 다른 농자재는 사용하지 않았으며, 비료피해 조사는 시험물질을 토양혼화처리 후 21일간 (7일, 14일, 21일) 총 3회에 걸쳐 외관상 비료피해 유무를 달관조사하였다.

Table 2-7. 비료피해의 판정기준

정도	판 정 기 준
0	육안으로 비료피해(肥害)가 인정되지 않음
1	아주 가벼운 비료피해(肥害)로서 작은 약반이 약간 인정됨
2	처리된 잎의 소부분에서 비료피해(肥害)가 인정됨
3	처리된 잎의 50퍼센트 정도 비료피해(肥害)가 인정됨
4	상당한 피해를 받고 있으나 아직 건전한 부분이 남아 있음



Fig. 2-22. 시험물질 및 토양 준비 전경



Fig. 2-23. 시험물질 처리, 유식물 정식

(나) 혼합 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험

혼합 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험은 상기 (가) 항과 동일한 방법으로 수행하였다.

(2) 계분 퇴비의 비해시험

(가) 왕겨 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험

왕겨 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험을 상기 (1)-(가) 항과 동일한 방법으로 수행하였다. 다만, 처리구는 무처리구, 기준량구 (400kg/10a), 2배량구 (800kg/10a)로 두어 유작물에 대한 비해 유무를 평가하였다.

(나) 혼합 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험

혼합 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험은 상기 (가) 항과 동일한 방법으로 수행하였다.

라) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 현장 재배 시험

(1) 일반 노지에서 작물 재배시험

본 실험에서 개발된 깔짚 소재가 적용된 우분 퇴비의 작물 생육효과는 관용퇴비, 톱밥퇴비 및 바이오차 혼합깔짚 퇴비의 시용량을 달리하여 조사하였다. 우분 퇴비를 이용한 현장 재배 시험은 경상남도 사천시에서 수행되었다. 재배 시험에 사용한 작물은 배추 (엇갈이배추)로 선정하였으며, 비료 및 퇴비의 처리량은 Table 2-6에서 보는 것과 같이 무처리, NPK, 관용퇴비 2,000 kg/10a, 톱밥퇴비 2,000 kg/10a, 바이오차 혼합깔짚 퇴비 2,000 kg/10a, NPK+관용퇴비 1,000, 2,000 및 4,000 kg/10a, NPK+톱밥퇴비 1,000, 2,000 및 4,000 kg/10a, NPK+바이오차 혼합깔짚 퇴비 1,000, 2,000 및 4,000 kg/10a로 처리하였다. NPK는 비료시비처방에 따른 시비량으로 설정하여 처리하였다. 작물의 파종일, 정식일, 재식거리 및 수확일은 Table 2-7에 나타내었으며, 시험구는 난괴법 3반복으로 배치하였다.

Table 2-8. 우분 퇴비 처리작물 및 처리조건

작물	처리조건
배추	무처리
	NPK
	관용퇴비 2,000 kg/10a
	톱밥퇴비 2,000 kg/10a
	바이오차 혼합깔짚 퇴비 2,000 kg/10a
	1,000 kg/10a
	NPK+관용퇴비
	2,000 kg/10a
	4,000 kg/10a
	1,000 kg/10a
	NPK+톱밥퇴비
	2,000 kg/10a
	4,000 kg/10a
	NPK+바이오차 혼합깔짚 퇴비
1,000 kg/10a	
2,000 kg/10a	
4,000 kg/10a	

Table 2-9. 작물 재배조건

파종일	정식일	재식거리	Plot 크기	수확일
2023. 3. 25.	2023. 4. 8.	40 × 40cm	2.5 × 1.5m	2023. 6. 2.



Fig. 2-24. 배추 파종 및 포장 준비 전경.

(가) 재배된 작물수량 및 무기성분 조사

퇴비의 종류 및 처리량에 따른 배추의 생육 특성과 무기성분 및 양분 흡수량에 미치는 영향을 조사하였다. 수확 후 배추는 먼지와 흙을 제거한 후 엽장, 엽폭, 엽수, 지상부 무게, 지하부 무게 및 총무게 등을 조사한 후 115°C dry oven에 건조하였으며 건조된 식물체의 건조량을 측정하여 처리구별 바이오매스량을 분석하였다. 처리구별 식물체 내의 무기성분 함량 및 흡수량은 dry oven에서 건조된 배추를 균일하게 분쇄한 후 배추 일정량을 시료 분해장치에 넣은 후 습식 분해를 통해 시료를 분해하였다. 분해액은 Filter paper No.6을 이용하여 불순물을 여과한 후 부피를 균일하게 한 후 일정량을 취하여 분석에 이용되었다. 배추의 무기성분은 T-N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn 및 B를 분석하였으며 유해물질로 Zn, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Hg를 분석하였다. 식물체 내 T-N는 킬달증류법, P, K, Ca, Mg, Na, B, Fe, Mn 및 Zn 등의 무기성분 및 중금속 함량은 ICP-OES를 이용하여 분석하였다.

(나) 토양 특성 변화

본 연구에서 토양의 화학적인 개량 효과를 조사하기 위해서 제조한 퇴비를 처리한 후 토양의 pH, EC를 측정하였으며, 토양 내 유기물 함량과 무기성분 (K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn 및 B) 등을 분석하였고, 이외의 유해성분의 함량도 분석하였다. 토양 pH 및 EC는 깔짚의 특성과 동일하게 분석되었으며 유기물 분석은 Tyurine법, T-N분석은 킬달증류법, P₂O₅분석은 Lancaster법을 이용하였다. 토양의 무기성분 및 중금속은 ICP-OES를 이용하여 분석하였다.

(다) 온실가스 발생량

퇴비의 종류 및 처리량에 따른 온실가스 발생량을 평가하기 위해서 작물 재배기간 동안의 온실가스 발생량을 조사하였다. 온실가스는 CO₂, CH₄ 및 N₂O를 조사하였으며, Static chamber method를 활용하여 가스를 포집하고 GC를 이용하여 분석하였다. 온실가스를 분석한 처리조건은 Table 2-6에 나타난 바와 같다. 작물 재배기간 동안 온실가스를 주기적으로 포집 및 분석하였으며 온실가스 배출량 산정식은 아래와 같다.

$$Emission\ rate\ (mg/m^2/day) = p \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{(T+273)} \times 24$$

p = 기체밀도 (mg/cm^3)
 V = 챔버 부피 (m^3)
 A = 챔버 표면적 (m^2)
 ΔC = 가스농도 증가량 (mg/m^3)
 Δt = 가스포집시간 (hr)
 T = 온도 ($^{\circ}C$)

누적 온실가스 배출량 산정식은 아래와 같으며 재배기간 전체의 온실가스 배출량을 총합한 값이다.

$$Total\ gas\ flux\ (kg/ha) = \sum_i^n (R_i \times D_i)$$

R_i = i 번째 샘플링 간격에서 일일 가스 플럭스 비율
 D_i = i 번째 샘플링 간격의 일수



Fig. 2-25. 가스 포집 전경

(라) 토양 내 미생물상 변화

토양 내 미생물상 변화를 평가하기 위해 미생물 군집 분포를 분석하였다. 미생물 군집 분포는 무처리 토양 및 바이오차 혼합갈짚 퇴비가 처리된 토양에서 시료를 채취하여 미생물 군집 분석 (Microbiome taxonomic profiling)을 의뢰하여 확인하였다.

(2) 양분 결핍토양에서 작물 재배시험

(가) 재배된 작물수량 및 무기성분 조사

본 연구를 통해 개발된 MC퇴비 처리 시 작물의 생육 및 토양특성 변화는 경남 양산시에 소재한 동아대학교 부속농장 (35.3072, 129.0704)에서 수행되었다. 본 시험은 시설하우스에서 수행되었으며, 작물은 배추를 선정하였으며, 시험포장 토양의 화학적 특성은 Table 2-10에서 보는 것과 같다. 이 토양은 경우 기존 사용되지 않던 미개간지를 개간하여 사용하였으며, 작물 생육에 필요한 양분이 결핍되어 있는 대표적인 토양이다. 본 실험에서 처리구는 무처리, NPK, MC (개발된 MC퇴비), N+MC 혼용 처리구로 구분하였으며, NPK의 시비량은 작물별 시비처방 기준에 의거 산정되었으며, MC의 시용량은 100, 200 및 400 kg/10a를 기준으로 포장에 처리하였다. 모든 처리구의 배치는 완전임의배치법으로 3반복하였다.

Table 2-10. 실험에 사용된 공시토양의 특성

pH	EC	OM	T-N	P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn
1:5	dS/m	--g/kg--		mg/kg	-----	cmol _c /kg	-----		-mg/kg-	
5.10	0.04	1.21	0.18	24.2	0.78	1.54	0.46	0.04	22154	915

(나) 토양 특성 변화

토양 특성 변화는 상기 (1)-(나)항과 동일한 방법으로 수행하였다.

(다) 온실가스 발생량

온실가스 발생량의 분석은 상기 (1)-(다)항과 동일한 방법으로 수행하였다.

(라) 토양 내 미생물상 변화

미생물 군집 분석을 위해 채취한 토양은 -20°C에 2일간 보관하여 동결건조한 후 미생물 군집 분석에 사용하였다. 미생물 군집은 개별적으로 미생물이 가지고 있는 고유 세포벽 지방산을 분석하는 FAME 방법을 이용하였다. 또한, 미생물의 정량은 internal standard 19:0을 이용하여 분석하였다. 미생물 군집 분석은 GC Agilent 6890N (Agilent Technologies, USA)과 HP-ULTRA 2 capillary column (25 m × 0.2 mm × 0.33 μm film thickness, Agilent Technologies, USA)을 이용하였다. 칼럼 온도는 170°C에서 270°C가 될 때 까지 분당 5°C씩 가온하였고 마지막 270°C에서 2분간 유지하였다. 분석된 미생물 세포벽 지방산은 MIDI software program package (MIDI, Inc., Newark, DE)을 이용하여 각각의 지방산에 대한 미생물 군집을 분석하였다. 총 세균은 i15:0, a15:0, 15:0, i16:0, 16:1ω9, 16:1ω7, i17:0, a17:0, 17:0, cy17:0, 18:1ω7c 및 cy19:0 함량을 합산하여 분석하였다. 그람음성 세균은 지방산 16:1ω7c, 18:1ω7c, cy17:0 및 cy19:0을 합산하였고, 그람양성 세균은 지방산 i15:0, a15:0, i16:0, i17:0 및 a17:0을 합산하여 구하였다. 방선균은 지방산 10Me18:0을 사용하였고, 곰팡이는 지방산 18:1ω9c와 18:2ω6c를 사용하였다. 또한, 지방산 16:1ω5c는 arbuscular mycorrhizal fungi의 biomarker로 이용하였다.



포장구획 (2023.06.02.)



비료처리 및 멀칭 (2023.06.03.)



포장구획 (2023.06.03)



가스챔버 설치 (2023.06.10)



작물이식 (2023.06.12)



야생동물 방지 그물망 설치 (2023.06.12)

Fig. 2-26. 양분 결핍토양에서 작물 재배시험 준비

마) 깔짚 실증 실험

(1) 1차 실증 실험

깔짚 실증 실험을 위해 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚 3가지의 깔짚을 계사에 투입하고 육계를 투입하여 출하할 때까지 사양 실험 및 깔짚의 모니터링을 수행하였다. 실험은 (주)하림 사육BU 사료사업부 실험농장에서 수행되었으며 2023년 5월 23일에서 2023년 6월 29일까지 5주간 실험하였다. 실험 품종은 A. A(무감별) 1,000수를 대상으로 하였으며, 왕겨는 50수 6반복으로 총 300수, 대패밥은 50수 7반복으로 총 350수, 바이오차 혼합깔짚은 50수 7반복으로 총 350수로 설정하였다.



Fig. 2-27. 실험에 사용된 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚

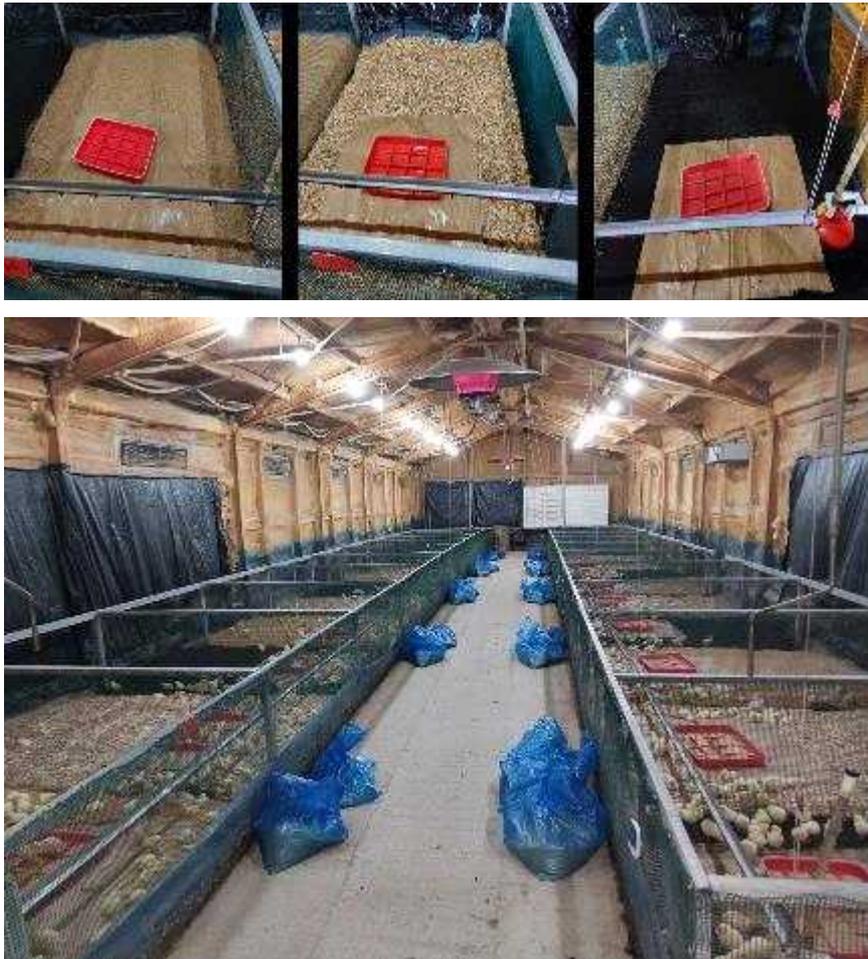


Fig. 2-28. 깔짚 실증 시험 전경

깔짚의 성능 및 안정성을 평가하기 위해 깔짚에 대한 특성 분석을 수행하였다. 물리적인 특성은 수분, 용적중, 수분흡수율 등을 확인하였으며, 깔짚의 독성을 확인하기 위해 살모넬라, 아플라톡신, 오클라톡신을 분석하였다.

사양 실험은 일반적인 사양 실험에서 수행되는 평체, 사료섭취량, cFCR, 생산지수, 육성율을 평가하였다.

육계분의 화학적 특성 변화 및 온실가스 발생량, 악취 발생량 및 부숙도는 깔짚 투입 후 주 1회 샘플링하여 분석하였다. 화학적 특성은 계분이 배출되어 있는 깔짚을 채취하여 K, Ca, Mg, Na, P, As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn, Fe, Mn 및 Li를 분석하였고, 온실가스는 챔버를 계사 내에 설치하고 30분 간 포집된 가스를 채취하여 GC를 활용해 CO₂, CH₄ 및 N₂O를 분석하였다. 악취는 환경부에서 고지한 22종의 지정악취물질을 분석하였으며, 각각의 처리구에서 샘플 채취구와 깔짚과의 거리를 약 10 cm로 하여 악취 샘플을 3L씩 채취하여 SIFT-MS를 활용하여 분석하였다. 부숙도는 콤팩을 활용하여 농촌진흥청 고시 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준에 준하여 분석하였다.



Fig. 2-29. 깔짚 샘플, 악취 및 온실가스 채취 전경

(2) 2차 실증 실험

2차 실증 실험은 2023년 7월 23일에서 2023년 8월 31일까지 5주간 수행되었으며, 상기 (1) 항의 1차 실증 실험과 동일한 방법으로 수행되었다. 다만, 처리구별 개체수는 각각 30수로 실험이 진행되었다.

(3) 3차 실증 실험

3차 실증 실험은 2023년 10월 11일에서 2023년 11월 15일까지 5주간 수행되었으며, 상기 (1) 항의 1차 실증 실험과 동일한 방법으로 수행되었다. 다만, 처리구별 개체수는 각각 40수로 실험이 진행되었다.

3) 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 실용화 및 산업화

가) 개발된 축사바닥 깔짚 소재 신시장 구축

(1) 신소재 축산 깔짚 제조공장 구축

신소재 축산 깔짚 제조공장을 경상남도 창원군에 구축하고 있으며, 제조공장 시설에 대한 도면을 확인하였다.

(2) 개발된 깔짚의 재활용환경성 평가

(가) 사업의 배경 및 목적

① 배경 및 목적

개발된 깔짚의 재활용 환경성 평가의 사업배경 및 목적, 대상폐기물의 발생·처리현황 및 대상폐기물의 재활용 필요성을 확인하고, 재활용제품 설명, 국내외 관련 산업현황 및 전망 및 재활용환경성평가 대상여부를 검토하였다

② 재활용 기대효과

재활용에 따른 환경적 측면의 기대효과와 경제적 측면의 기대효과를 분류하여 검토하였다.

(나) 대상폐기물 배출사업장 현황

① 일반현황

대상 폐기물사업장의 정보, 대상폐기물의 물리화학적 특성, 대상폐기물 발생공정, 폐기물 발생량 및 처리현, 대상폐기물 및 재활용제품 운반·보관 계획, 대상폐기물 배출사업장과 재활용 사업자간 계약에 대한 내용을 검토하였다

(다) 재활용시설 운영 및 품질관리계획

① 재활용제품의 성능확인

원료물질 및 재활용 제품에 대한 품질관리기준을 확립하였다.

(라) 재활용환경성평가 현장조사 관련 재활용공정 시연 계획

① 시연계획

② 대체시설 현황

③ 재활용제품 납품업체 시연계획

(3) 농민단체와 공동사업 추진

(4) 기업형 유통망 공략 ((주)하림)

나) 개발된 축사바닥 깔짚 신소재의 유통 및 사업화 전략 구축

깔짚 시장 규모, 축분퇴비의 국내외 주요 수요처 현황, 국내외 경쟁기관 및 기술 현황, 표준화 전략, 사업화 전략, 투자 및 생산계획을 검토하였다.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

가. 정성적 연구개발성과

1) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 제조 원천기술 개발

가) 축사바닥 깔짚 소재 제조 원천기술 개발

(1) 다양한 수분조절재 및 보조제들의 이화학적 특성 평가

(가) 수분조절재

축사바닥 깔짚 소재 개발을 위한 최적 수분조절재를 선정하기 위하여 톱밥, 왕겨, 피트모스, 코코피트, 대패밥 및 백향나무 톱밥의 화학적 특성을 조사하였으며, 그 결과는 Table 3-1에서 보는 것과 같다. EC는 코코피트가 2.8 dS/m로 다른 수분조절재들에 비해 가장 높았고 코코피트를 제외한 나머지 수분조절재의 EC는 0.53-1.17 dS/m의 범위였다. pH의 경우 톱밥, 왕겨 및 코코피트는 비교적 중성을 나타내는 반면에 피트모스, 대패밥, 백향나무 톱밥은 산성을 나타내었다. 유기물의 함량은 수분조절재 종류와 관계없이 86.6-96.6%의 범위를 보였다. 질소의 함량의 경우 왕겨가 0.344%로 다른 수분조절재에 비해 높았다. P₂O₅, K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 수분조절재 종류에 따라 매우 상이한 결과를 보였으나, 특히 코코피트는 다른 수분조절재에 비해 다량의 무기성분을 함유하고 있었다. 가축분뇨 퇴비화 과정에서 수분조절재의 역할은 다량의 수분을 함유한 가축분뇨를 퇴비화에 용이한 수분함량으로 조절해 주기 위해 사용이 되지만, 생산된 퇴비가 토양에 양분으로 적용된다는 점에서 다량의 무기성분을 함유한 코코피트는 양분공급적인 측면에서도 우수한 수분조절재가 될 것으로 판단된다.

Table 3-1. 다양한 수분조절재의 화학적 특성

Treatment	EC (dS/m)	pH (1:10)	OM --- (%)	T-N ---	P ₂ O ₅ -----	K -----	Ca (mg/kg)	Mg -----	Na -----
Sawdust (Pine)	0.53	8.0	99.8	0.04	0.052	652	672	135	1044
Sawdust (Cedar)	0.72	4.7	95.3	0.05	0.016	75.8	ND	1.09	ND
Rice husk	0.85	6.6	86.6	0.34	0.052	3668	105	210	113
Peat moss	1.17	4.5	95.3	0.07	0.467	270	1082	1596	906
Cocopeat	2.80	6.7	91.2	0.02	0.268	19865	12191	1628	4803
Wood shaving (I)	0.64	4.9	96.6	0.02	0.023	3.79	ND	ND	ND
Wood shaving (II)	0.55	4.9	95.4	ND	ND	4.77	ND	ND	2

본 실험에 사용된 수분조절재들의 유해성분 함량은 Table 3-2에서 보는 바와 같다. Fe, Mn, Cr, Ni, Pb 및 Zn의 함량은 각각 0.13-8.71, 0.1-3.3, 0.009-0.053, 0.003-0.028, 0.001-0.003 및 0.008-0.29 mg/kg 범위로 아주 미량 또는 검출한계 이하로 존재하였다. 특히, 모든 소재에서 As는 검출되지 않았다. 유해성분 조사 결과 소재 모두 규격에 부합하는 것으로 조사되었다. 이와 같이 본 실험에 사용된 어떠한 수분조절재를 이용하여 축사바닥 깔짚 소재로 활용하고, 이들이 퇴비화하여 다시 토양에 퇴비로 적용할 시 안정성에 대한 문제는 없을 것으로 판단된다.

Table 3-2. 다양한 수분조절재의 유해성분 함량

Treatment	Fe	Mn	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	----- (mg/kg) -----								
Sawdust (Pine)	67.5	89.1	ND	ND	4.2	ND	ND	0.2	ND
Sawdust (Cedar)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Rice husk	ND	180.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Peat moss	822	18.8	ND	ND	7.0	ND	1.8	0.8	ND
Cocopeat	1031	50.8	ND	ND	0.1	ND	0.2	ND	3.9
Wood shaving (I)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Wood shaving (II)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

다양한 수분조절재들의 물리적 특성은 수분함량, 수분흡수율, 용적밀도 및 유효입경을 조사하였으며, 그 결과는 Table 3-3에서 보는 것과 같다. 수분조절재들의 수분함량은 피트모스와 코코피트가 37.4 및 35.4%로 다른 수분조절재들에 비해 비교적 높았다. 왕겨의 경우 수분함량은 8.7%으로 분석된 모든 수분조절재 중 가장 낮은 수분함량을 보였다. 하지만 수분 흡수율의 경우는 수분조절재가 보유하고 있는 수분의 양과 관계없이 코코피트가 1075%로 가장 높았고, 그 다음은 피트모스가 683%로 높았던 반면에 왕겨는 258%로 저조한 수분흡수율을 보였다. 일반적으로 코코피트나 피트모스의 경우 다량의 humus를 포함하고 있는데, 이들 humus는 그 무게의 4-6배의 물을 흡수할 수 있는 능력이 있는 것으로 보고되어졌다. 이와 같이 코코피트나 피트모스의 높은 수분흡수율은 내부에 존재하는 humus에 의해 기인된 것으로 판단된다. 특히, 피트모스와 코코피트는 유기물로서 섬유소의 함량이 높아 톱밥과 유사한 특성을 갖고 있고, 보수력이나 보비력이 우수하여 퇴비 제조 시 톱밥을 대신하여 수분조절제로 사용이 가능하며, 미생물의 활동을 촉진하는 것으로 알려져 있다. 각 수분조절재들의 용적밀도는 0.05-0.22 g/cm³의 범위였으며, 유효입경은 0.06-0.25 mm의 범위였다. 일반적으로 수분조절재의 기능은 수분조절 이외에 pH 조절, C/N비율을 조절, 입자 간의 공극을 지지하고, 퇴비 형상을 유지시켜주며, 혼합물 사이의 공극량과 공기량을 증가시켜 주는 역할을 한다. 하지만 유효입경이 작다는 것은 입자가 세밀하다는 것을 의미하고, 세밀한 입자를 가진 수분조절재들은 수분유입 시 쉽게 뭉쳐지거나 퇴비의 눌림현상이 발생하여 공기가 통할 수 있는 공간이 적어져 퇴비화 관련 미생물이 이용할 산소가 부족해져서 퇴비화 미생물의 활력이 저하되는 현상이 발생되게 되고, 결국 완숙된 퇴비를 생산하기 어려워진다. 이에 유효입경이 작은 수분조절재를 퇴비화할 시 산소의 공급이 원활하게 할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단된다.

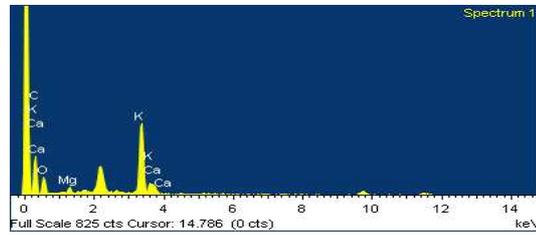
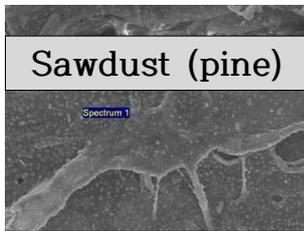
Table 3-3. 다양한 수분조절재들의 물리적 특성

Treatment	WC ----- (%)	WAR -----	Bulk density (g/cm ³)	Effective grain size (mm)
Sawdust (Pine)	20.1	585	0.14	0.25
Sawdust (Cedar)	10.1	188	0.22	0.12
Rice husk	8.7	258	0.12	0.16
Peat moss	37.4	683	0.15	0.06
Cocopeat	35.4	1075	0.15	0.07
Wood shaving (I)	8.9	589	0.05	0.21
Wood shaving (II)	10.5	590	0.05	0.18

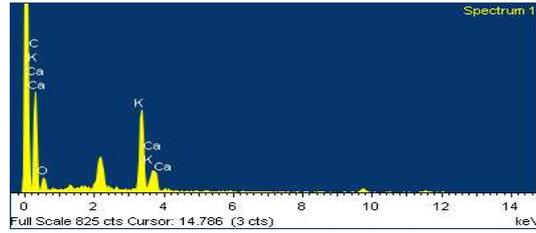
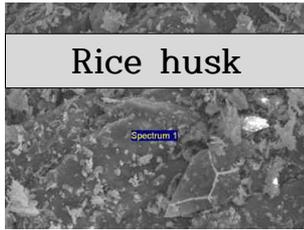
(WC; water contents, WAR; water absorption rate)

SEM-EDS를 이용한 다양한 수분조절재들의 표면구조 및 원소분포특성은 Fig. 3-1에서 보는 것과 같다. 수분조절재들의 표면구조는 원시료에 따라 다양한 형태를 보였고, 대부분 탄소 및 산소와 일부 무기성분으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

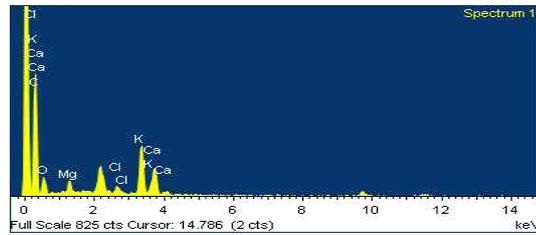
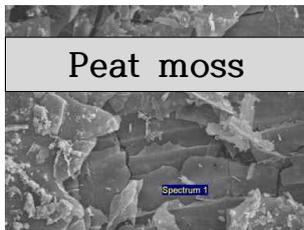
FTIR을 이용하여 본 실험에 사용된 다양한 수분조절재들의 표면 관능기를 분석한 결과는 Fig. 3-2에서 보는 것과 같다. 톱밥, 피트모스, 코코피트 등 수분조절재에서 다양한 파장에서 peak가 관찰되어졌는데, 이 중 3400 cm⁻¹의 hydroxyl group과 연관이 되어 있으며, 이는 원시료에 포함된 수분에 의한 관능기로 판단되어 진다, 또한, 1080 cm⁻¹의 파장에서 나타난 peak는 carbonyl group, hydroxyl group, carboxyl group 등과 관련이 있으며, 이는 본 실험에 사용된 수분조절재 모두가 목질계 바이오매스로서 다량의 cellulose (28-36%) 성분이 존재하고 있다는 것을 증명한다. 그 외에도 750 cm⁻¹에서 C-H, 1,120 cm⁻¹에서 지방족 C-OH stretching, 1,350 cm⁻¹에서 C-N구조가 나타났으며, 1,460 cm⁻¹에서 -CH₂, 1,610 cm⁻¹방향족 carbonyl/carboxyl C=O, 1,680 cm⁻¹에서 방향족 C=C ring stretching, 2,880 cm⁻¹에서 C-H가 나타났다.



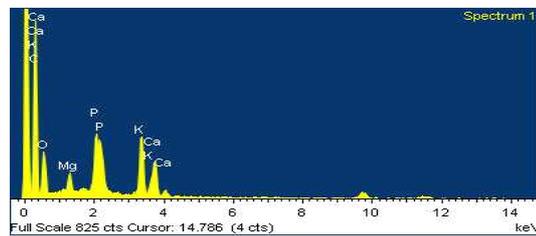
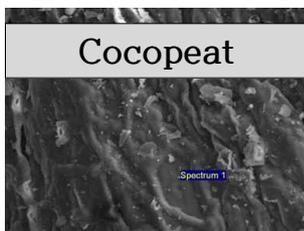
Element	Weight %	Atomic %
C	46.97	32.40
O	21.00	49.88
Mg	2.25	1.72
K	31.06	14.74
Ca	2.73	1.26



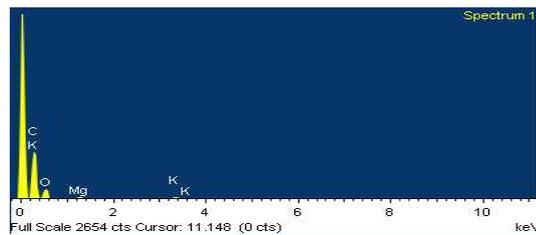
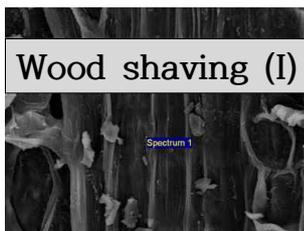
Element	Weight %	Atomic %
C	42.96	58.98
O	27.98	28.83
K	22.29	9.40
Ca	6.78	2.79



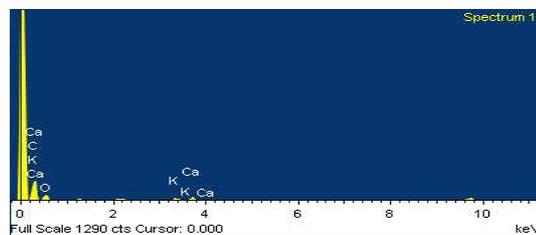
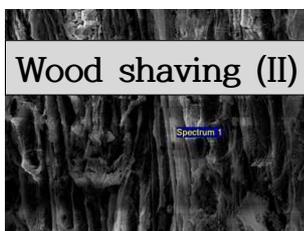
Element	Weight %	Atomic %
C	54.45	67.71
O	26.27	24.53
Mg	1.78	1.09
Cl	1.19	0.50
K	10.02	3.83
Ca	6.28	2.34



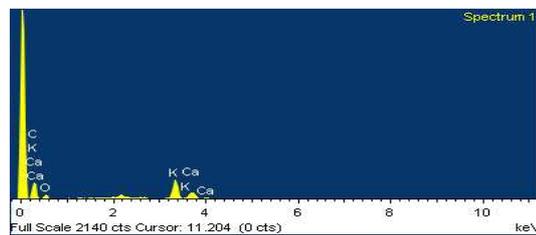
Element	Weight %	Atomic %
C	53.58	65.50
O	30.35	27.85
Mg	1.71	1.03
P	2.73	1.29
K	6.99	2.62
Ca	4.65	1.70



Element	Weight %	Atomic %
C	32.75	49.07
O	26.66	29.99
Mg	7.45	5.51
P	2.84	1.65
K	14.46	6.65
Ca	15.84	7.11



Element	Weight %	Atomic %
C	62.37	70.71
O	31.81	27.08
Mg	0.95	0.53
K	3.00	1.05
Ca	1.86	0.63



Element	Weight %	Atomic %
C	36.73	52.21
O	32.14	34.29
K	21.97	9.59
Ca	9.17	3.91

Fig. 3-1. SEM-EDS를 통한 다양한 수분조절재들의 표면구조 및 원소분포 특성.

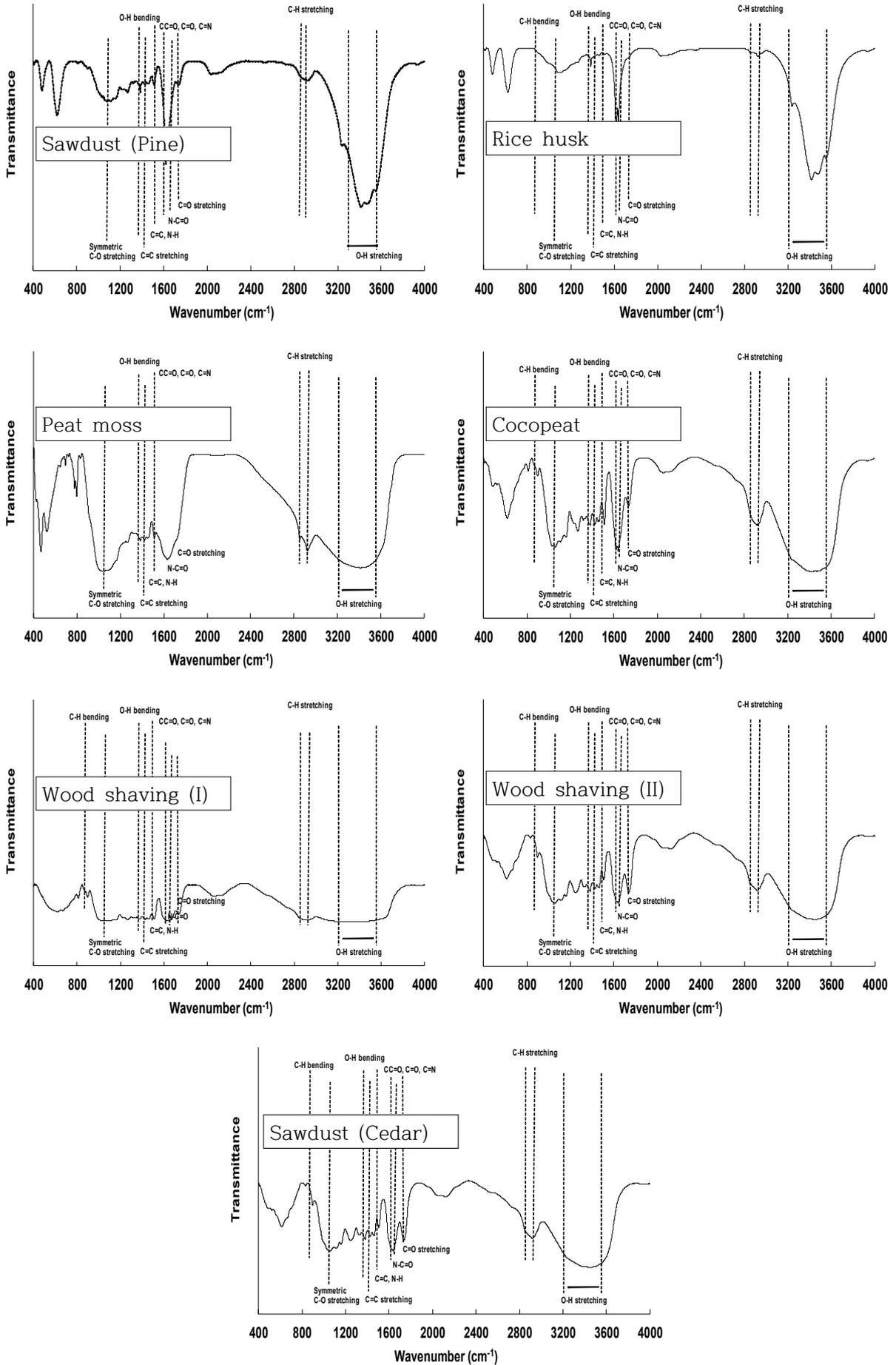


Fig. 3-2. FTIR를 이용한 다양한 수분조절재들의 관능기.

(나) BPP-BA

바이오매스 전소발전소로부터 배출된 BPP-BA의 물리화학적 특성은 Table 3-4에 나타내었다. BPP-BA의 탄소 함량은 69.2%, pH는 9.50이었다. BPP-BA의 비표면적은 301.5 m²/g로 나타났으며, 581%의 수분흡수율을 보유했다.

Table 3-4. BPP-BA의 물리화학적 특성

Treatment	BPP-BA
pH (1:5)	9.50
EC (dS/m)	0.18
SSA (m ² /g)	301.5
WAR (%)	581.0
C (%)	66.48
H (%)	1.3
O (%)	29.6
N (%)	0.14
Na (%)	0.26
K (%)	0.36
Ca (%)	0.95
Mg (%)	0.30
P ₂ O ₅ (mg/kg)	40.2

(BPP-BA: Bottom ash, SSA: Specific surface area, WAR: water absorption rate)

깔짚에 사용되는 바이오차는 수분흡수율이 중요하기 때문에 공극 구조가 발달되어 있는 바이오차가 반드시 필요하다. 일반적인 바이오차는 350℃ 이상에서 열분해된 것으로 350-500℃까지는 비표면적이 넓지 않아 깔짚으로서의 기능성을 가지기 힘든 것으로 판단된다(Fig. 3-3). 따라서 깔짚으로 사용되기 위한 바이오차는 비표면적이 500℃ 이상에서 급격하게 증가하기 때문에 최소 500℃ 이상에서 열분해되어야 하며, 보다 안정적인 공극구조가 발달될 수 있는 고온 바이오차가 적합할 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 바이오차는 600℃에서 제조된 고온 바이오차로 비표면적이 301.5 m²/g으로 깔짚 소재로 적합한 것으로 판단된다.

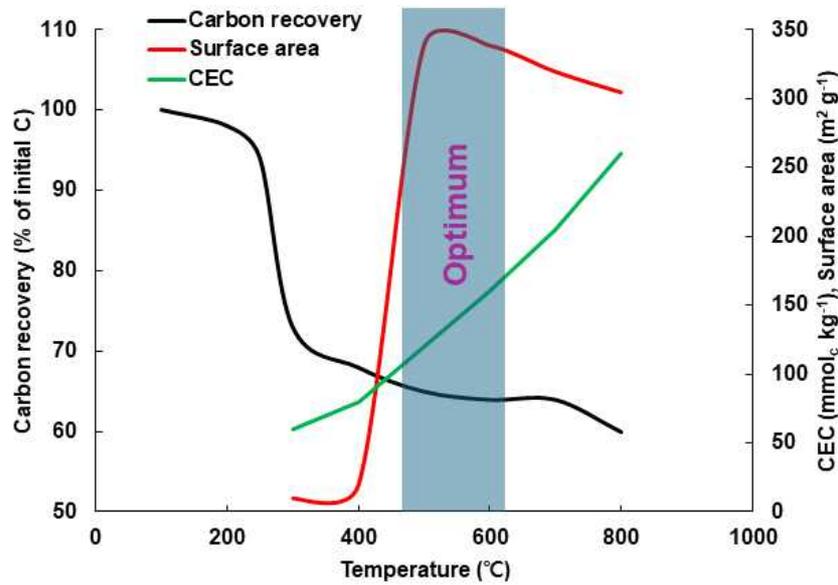


Fig. 3-3. 열분해 온도변화에 따른 비표면적 변화를 고려한 최적 바이오차 제조조건

BPP-BA의 FT-IR 결과는 Fig. 3-4에 나타내었다. BPP-BA는 800-400 cm⁻¹ 부근에서 많은 금속산화물이 존재하고 있고, 800-500 cm⁻¹에서 C-O Stretching 등 다양한 관능기가 발견되었으며 1300 cm⁻¹ 부근에서 C=C Stretching, 1600-1200 cm⁻¹에서 CC=O, C=O 및 C=N 결합, 3600-3200 cm⁻¹에서 O-H Stretching이 존재하는 것을 확인하였다.

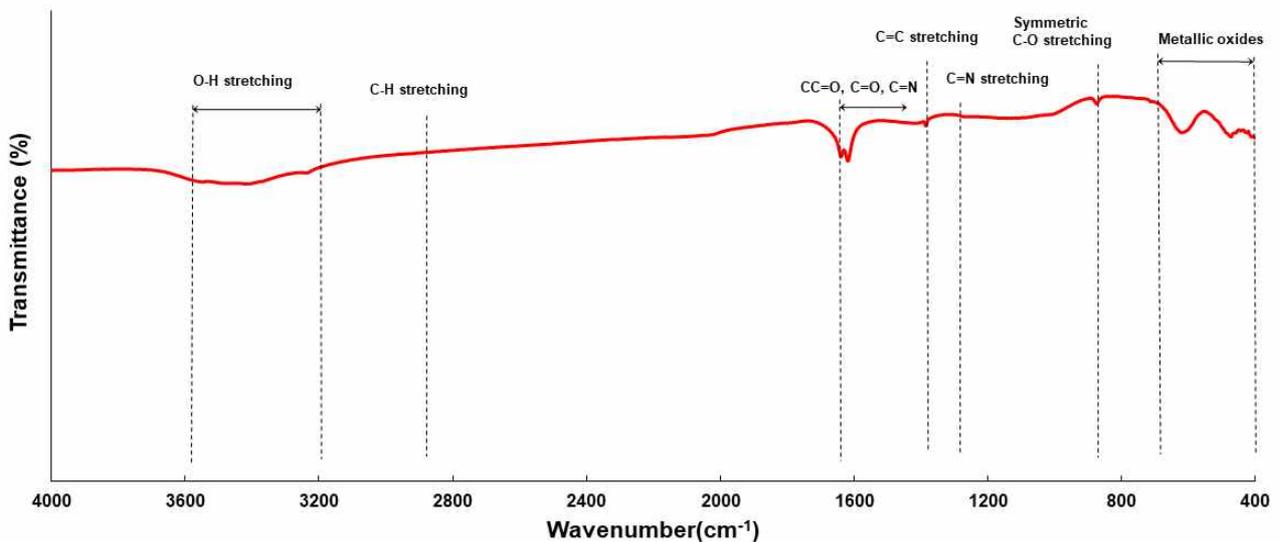


Fig. 3-4. BPP-BA의 FT-IR 결과.

BPP-BA의 표면을 SEM-EDS를 이용하여 조사한 결과는 Fig. 3-5에서 보는 바와 같다. 일반적으로 다공성 물질로 알려진 바이오차와 유사하게 BPP-BA 또한 표면에 다공성 구조가 발달된 형태로 존재하였다.

BPP-BA의 표면 원소 함량은 탄소 및 산소 함량이 65.2% 및 27.5%였으며, 탄소 및 산소 함량을 제외한 나머지 무기성분에서 Mg, Al 및 Si가 검출되었다. Mapping을 통한 원소 분포도에서 BPP-BA는 탄소 및 산소가 매우 조밀하게 이루어져 있음을 확인하였다.

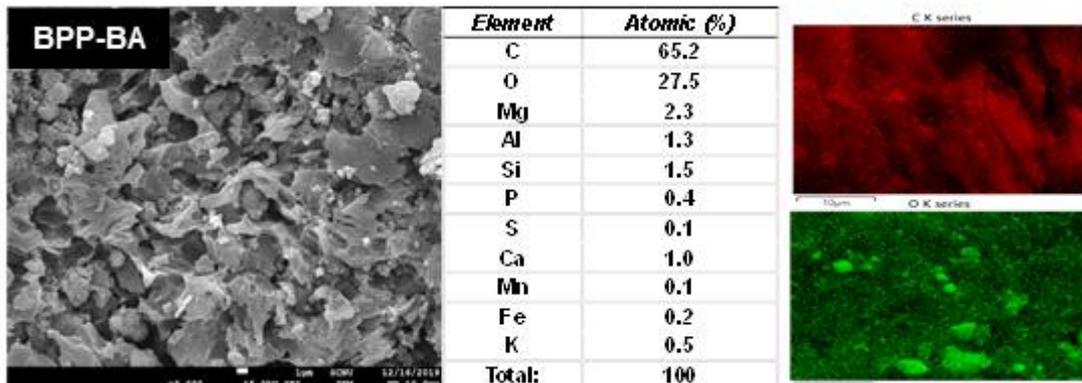


Fig. 3-5. SEM-EDS mapping기법을 이용한 BPP-BA 및 우드펠릿 기반 biochar의 표면구조 및 원소분포 특성.

이와 같이 BPP-BA는 높은 수분흡수율과 고농도의 탄소를 함유하고 있기 때문에 가축분뇨 퇴비화를 위한 수분조절재로 활용가능성이 매우 높을 것으로 판단된다. 특히 바이오매스의 열분해 과정을 통해 생산되는 biochar는 시료의 균질성 및 경제성을 확보하기 어려워 대규모 실용화/산업화에 제한적이었다면, 바이오매스 전소발전소로부터 배출되는 BPP-BA는 그동안 발전소 폐기물로 간주되어 왔기 때문에 이들을 가축분뇨 퇴비화를 위한 수분조절재로 활용한다면 기존 biochar의 산업화/실용화에 대한 문제점을 극복하고 발전소 현장 애로사항을 동시에 해결할 수 있는 획기적인 전략이라 판단된다.

(2) 축사바닥 깔짚 소재의 최적화

(가) 깔짚 소재로서 최적의 수분조절재 선정

깔짚 소재로서 최적의 수분조절재를 선정하기 위하여 상기 (1)항에서 수분흡수율이 뛰어나고, 퇴비화 시 기능이 뚜렷한 톱밥, 왕겨, 코코피트 및 피트모스를 가축분뇨와 혼합한 후 다양한 온도에서 퇴비화를 실시하였다. 각 수분조절재를 이용한 가축분뇨의 퇴비화 과정 온도변화는 Fig. 3-6와 같이 모든 보관 온도에서 5-10일 사이에 온도가 급격히 증가되기 시작하였으며, 12일을 기점으로 온도는 다시 감소하는 경향이었다. 일반적으로 퇴비화 과정은 초기단계-고온단계-숙성단계 순으로 진행되며, 퇴비 더미의 온도 상승은 초기 중온성 미생물의 영향으로 그리고 고온기에서 고온성 미생물의 영향으로 온도가 급격히 상승하게 된다.

이러한 퇴비화 과정 중 온도 상승은 유해선충, 다수 식물의 병원균, 박테리아 사멸에 기여하며, 온도가 다시 감소하는 숙성단계에서 각종 유익한 미생물이 발생하여 정착하게 된다. 특히, 본 연구에서 피트모스 및 코코피트를 가축분뇨 퇴비화의 수분조절재로 이용하였을 경우, 다른 처리구에 비해 고온단계가 빨리 시작되는 것을 알 수 있었는데, 이는 피트모스 및 코코피트는 가축분뇨 내에 미생물의 활성을 촉진했기 때문으로 판단된다. 게다가 15일차 뒤집기 이후 온도가 크게 증가하지 않고 빠르게 감소한 것은 유기물 분해가 빠르게 일어나 부숙이 촉진되기 때문이다.

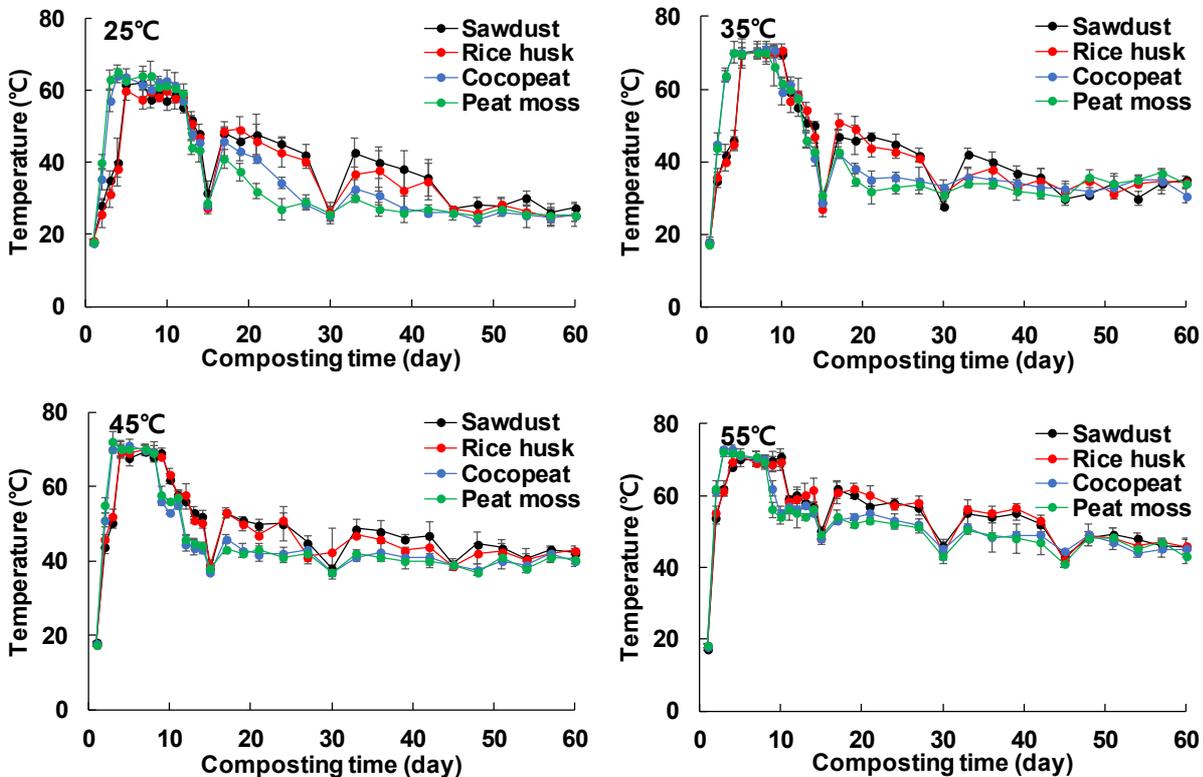


Fig. 3-6. 퇴비화 중 수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비 더미의 온도 변화.

수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비화 과정 중 수분함량 변화는 Fig. 3-7에서 보는 것과 같다. 수분조절재 종류 및 온도에 관계없이 퇴비화 시기가 경과 함에 따라 각 수분조절재가 포함된 가축분뇨 퇴비의 수분함량은 점진적으로 감소하는 경향이었다. 퇴비화 과정 중 수분함량의 감소는 퇴비화 과정 중 유기물의 산화분해로 인한 열이 발생되어 퇴비 더미 속의 온도가 상승함에 따라 수분함량이 감소한 것으로 판단된다.

수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비화 과정 중 pH 변화는 Fig. 3-8에서 보는 것과 같이 퇴비화 기간이 40일까지는 약알카리성을 나타내다 40일 이후에서부터 pH가 급격히 감소하기 시작하여 퇴비화 종료 시점인 60일 부근에서는 거의 중성 상태를 나타내었다. 이러한 현상은

온도에 따라 유의적인 차이없이 비슷한 결과를 보였다. 초기 퇴비화 과정에서 강알칼리성을 나타내는 것은 본 실험에 사용된 우분의 pH가 9.8로서 강알칼리성을 나타내었기 때문이며, 초기 유기물의 분해 과정을 통하여 유기산이 생성되어 pH가 약간 감소하기는 하였으나 큰 차이는 없었는데, 이는 유기산의 생성되는 만큼 단백질 분해 과정에서 배출되는 암모니아 형성에 의해 어느 정도 완충작용이 일어났기 때문이다. 하지만 40일 이후에 pH가 급격히 감소하는 것은 암모니아는 높은 pH로 인하여 휘산이 일어나고 유기물의 지속적인 분해를 통한 유기산이 발생되기 때문으로 판단된다.

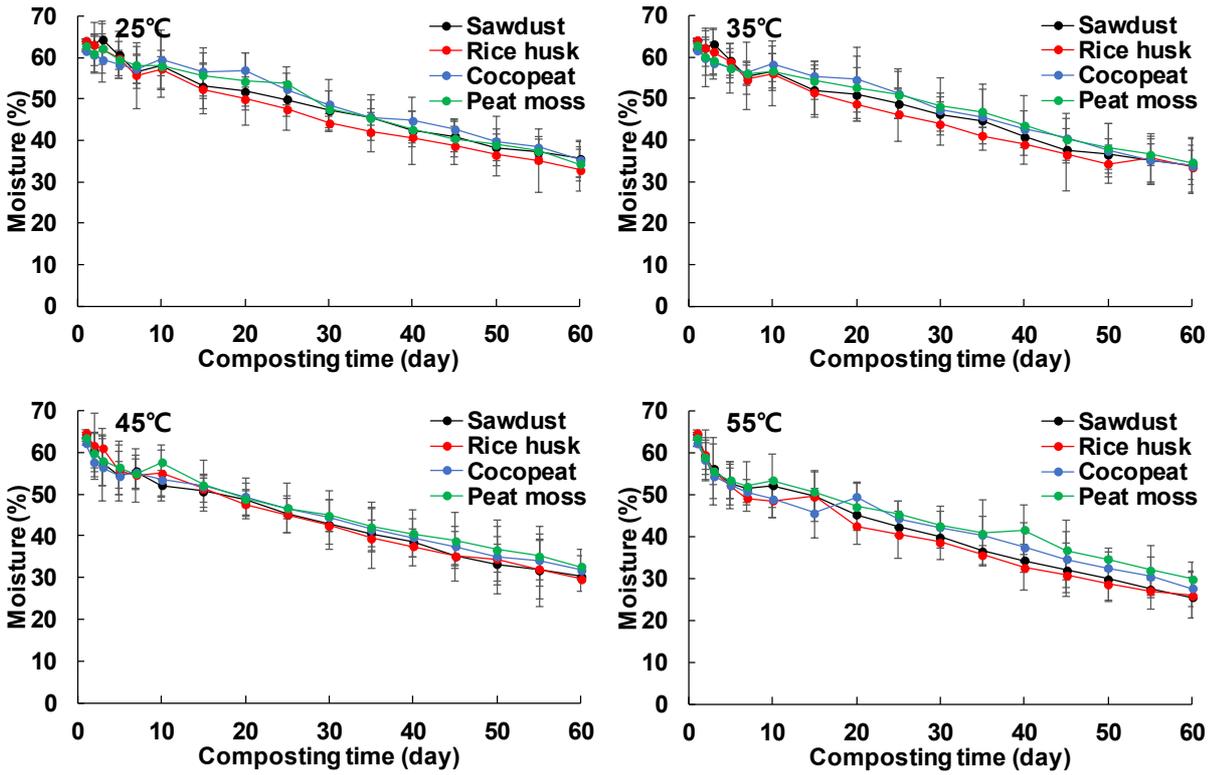


Fig. 3-7. 수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비화 과정 중 수분함량 변화.

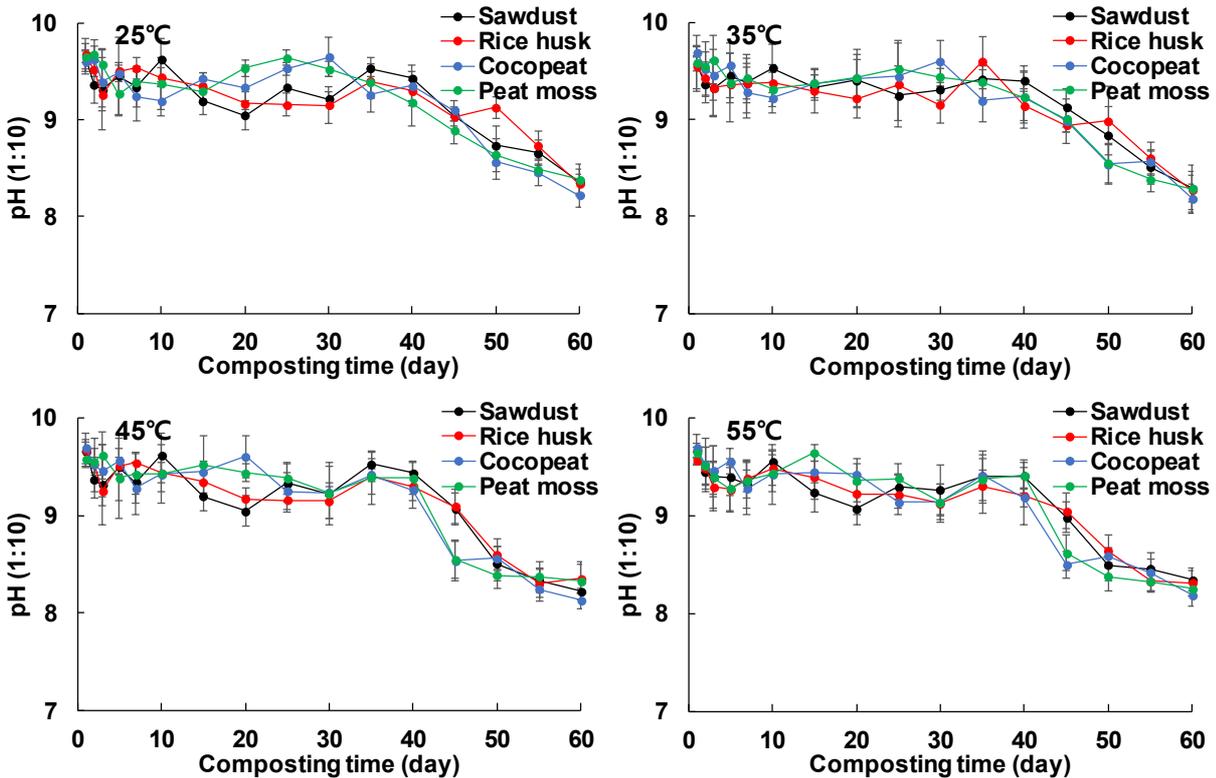


Fig. 3-8. 수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비화 과정 중 pH 변화.

수분조절제 및 온도에 따른 EC 변화는 Fig. 3-9에서 보는 것과 같이 수분조절제 종류 및 온도에 관계없이 퇴비화 기간이 경과함에 따라 지속적으로 감소하는 경향이였다. 특히 온도가 증가함에 따라 EC가 급격하게 감소되어지는 기간이 짧아졌는데, 이는 온도가 증가함에 따라 퇴비화 미생물의 활성이 촉진되어 유기물의 분해가 더 빠르게 일어났기 때문으로 판단된다. 일반적으로 퇴비화 과정 중 발생된 휴믹기질은 미생물의 2차 분해로 인하여 macro- 및 micro-유기산으로 전환되어지며, 이들은 퇴비화 과정에서 EC를 감소시키는 중요한 원인이 된다.

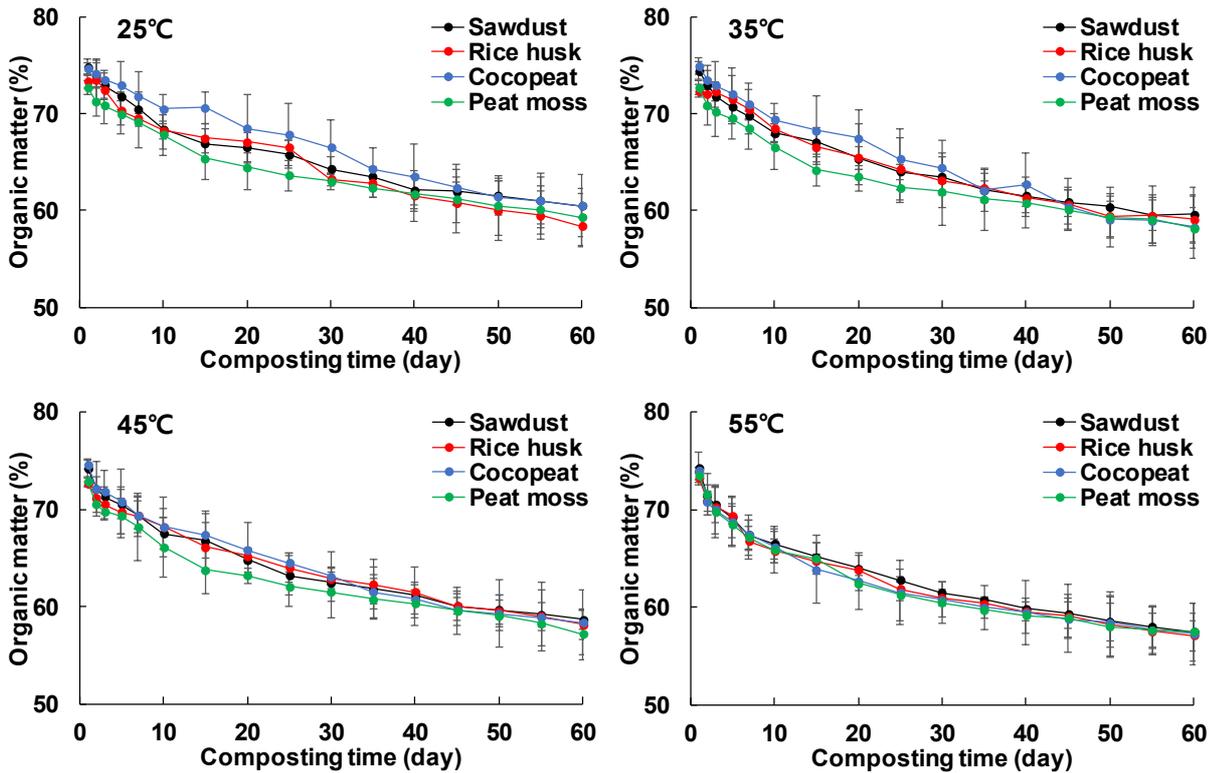


Fig. 3-9. 수분조절제 종류 및 온도에 따른 퇴비화 과정 중 EC 변화.

수분조절제 종류 및 온도에 따른 유기물의 변화는 Fig. 3-10에서 보는 것과 같다. 퇴비화 과정 중 유기물의 함량은 수분조절제의 종류에 따라서는 유의적인 차이를 나타내지 않았으나, 온도가 증가함에 따라 유기물의 함량은 감소하였다. 이는 앞선 EC, pH의 결과에서 언급된 바와 같이 퇴비의 온도가 증가함에 따라 유기물을 분해할 수 있는 미생물의 활성이 촉진되었기 때문으로 판단된다. 하지만 퇴비화 후기가 될수록 유기물 함량의 감소폭은 줄어들었는데, 이는 분해가능한 유기물이 대부분 부식질로 변화되었기 때문이다. 일반적으로 유기물의 퇴비화 과정은 호기성 분해에 의해 이루어진다. 이들의 분해과정은 크게 3부분으로 구분되는데, 첫 번째는 유기물 중에 있는 분해가 쉬운 당류 및 아미노산 등과 같은 물질들이 분해되는 과정, 그리고 유기물 내에 포함되어 있는 cellulose 및 pectin 등이 분해되는 단계, 마지막으로 분해되기 어려운 물질들이 최종적으로 남아있는 숙성단계를 거치면서 퇴비화 과정은 종결되게 된다.

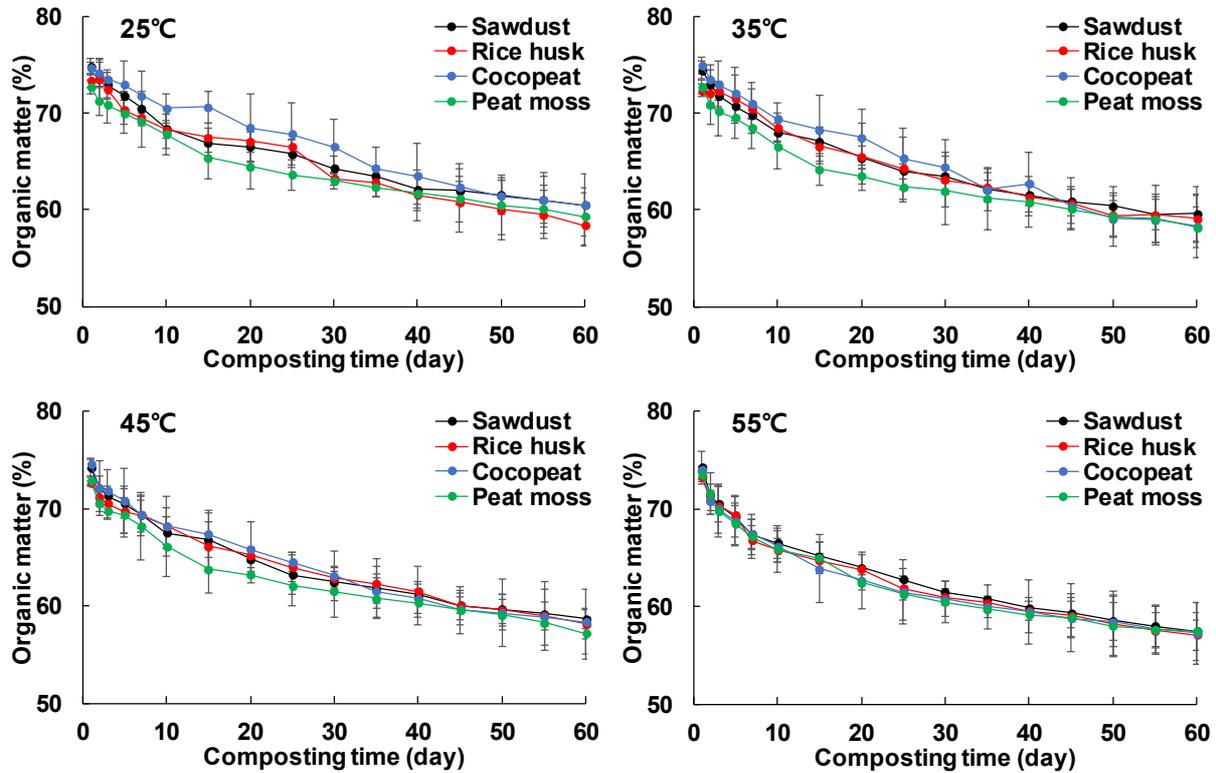


Fig. 3-10. 수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비화 과정 중 유기물 함량 변화.

수분조절재 종류 및 온도에 따른 질소의 변화는 Fig. 3-11에서 보는 바와 같이 퇴비화 기간이 증가됨에 따라 질소의 함량은 증가되는 경향이였다. 유기물이 분해됨에 따라 퇴비의 중량이 감소되었기 때문에 단위 g당 질소의 함량은 증가한 것으로 판단된다. 일반적으로 퇴비화 과정에서 퇴비화 기간이 증가함에 따라 탄소의 함량은 감소되고 질소의 함량은 증가되는 것으로 보고되어졌다. 특히 피트모스 및 코코피트가 포함된 가축분뇨 퇴비에서 질소의 함량은 다른 처리구에 비해 높았는데, 이는 2가지 이유로 요약될 수 있다. 첫 번째는 피트모스 및 코코피트 원재료의 질소함량이 톱밥이나 왕겨에 비해 높았기 때문이며, 다른 한가지 이유는 코코피트 및 피트모스는 톱밥이나 왕겨에 비해 가축분뇨 퇴비화 과정시 유기물의 분해를 활발하게 조장하기 때문에 퇴비의 부피가 감소하여 단위 g당 질소함량이 증가한 것으로 판단된다. 특히, 퇴비화 과정에서 2차 부숙단계는 사상균 및 방선균의 개체 증가로 인하여 암모니아태 질소가 질산태질소로 전환되고 안정한 질소화합물이 증가되기 때문에 퇴비화 시간이 경과함에 따라 질소함량이 증가된다고 보고되었다.

수분조절재 종류 및 온도에 따른 유기물/질소 비는 Fig. 3-12에서 보는 것과 같다. 유기물 대 질소의 비는 퇴비화 기간이 경과함에 따라 점진적으로 감소되었는데, 이는 퇴비화 과정 중 유기물의 함량은 감소되고, 질소의 함량은 증가되기 때문이다. 본 실험에 사용된 우분뇨의 유기물/질소의 비는 64.6으로 이는 비료품질검사기준 (45이하)에 부적합하다. 하지만 수분조절재를 이용함에 따라 최종 퇴비화가 종료된 시료 내에 유기물/질소의 비는 수분조절재에 관계없이 32-39의 범위로 비료품질검사 기준에 만족하였다. 또한 온도가 증가됨에 따라 유기물/질소의 비도 약간씩 감소하는 경향이였다.

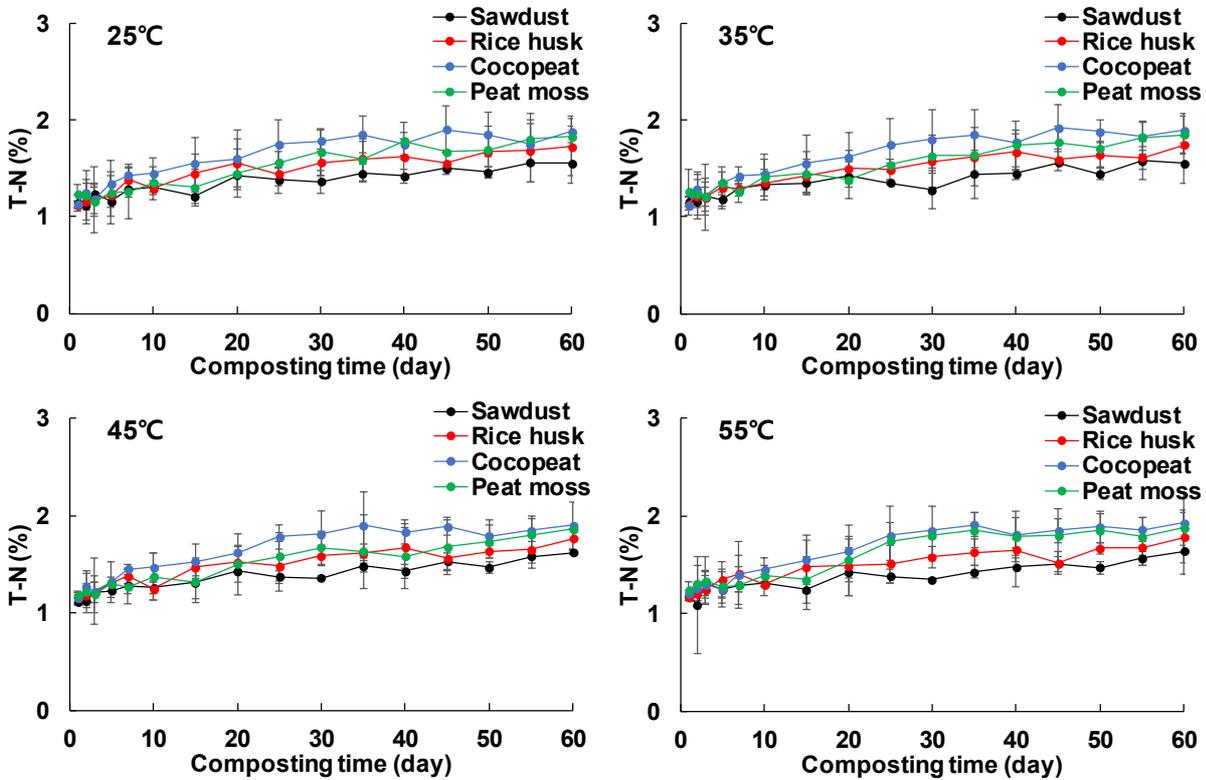


Fig. 3-11. 수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비화 과정 중 질소의 함량 변화.

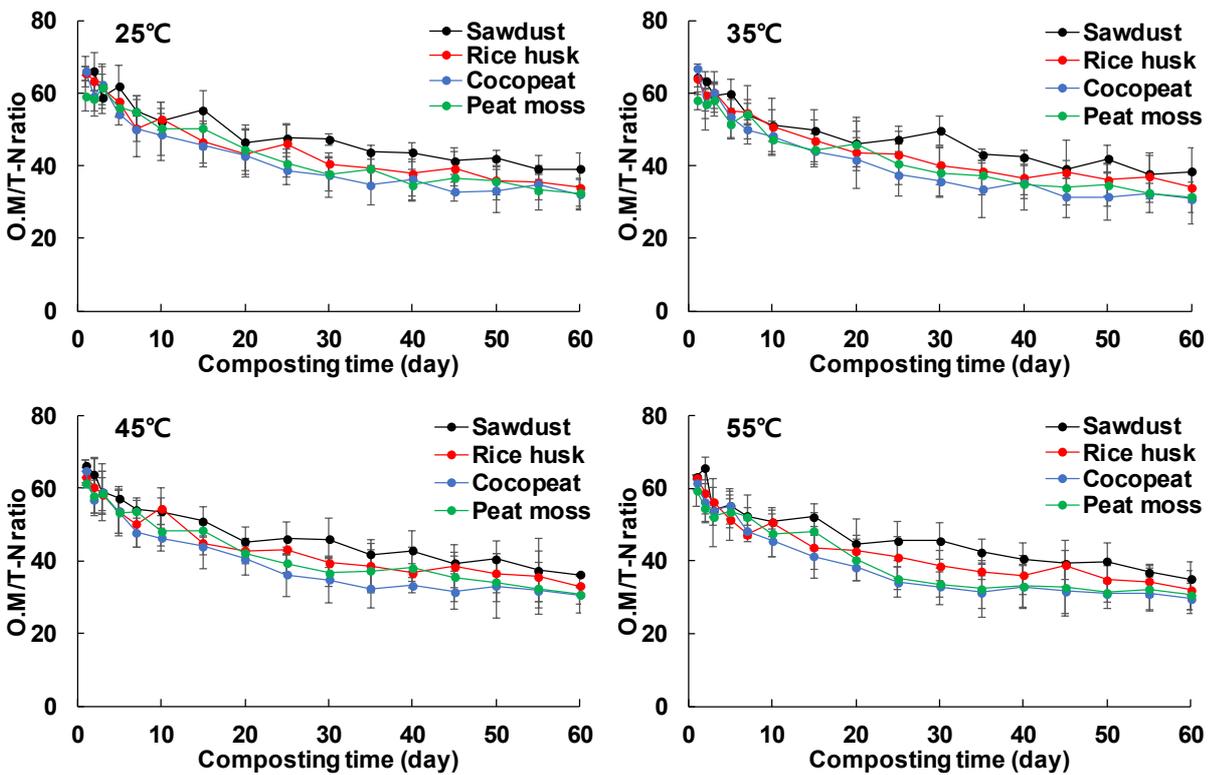


Fig. 3-12. 수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비화 과정 중 질소의 함량 변화.

솔비타법을 이용한 수분조절재 종류별 생산된 퇴비의 부숙도 평가 결과는 Fig. 3-13 및 Fig. 3-14에서 보는 것과 같다. 특히 솔비타법을 이용한 부숙도 평가는 CO₂ 및 NH₃ 가스 발생으로 변색된 정도를 보고 점수를 채점하며, 채점된 결과를 평가 시트에 적용하여 최종 부숙도를 판정하게 된다. 본 연구에서 사용된 수분조절재인 톱밥, 왕겨, 코코피트 및 피트모스 모두 부숙후기 판정을 받았으며, 비료품질검사 기준상 솔비타법에 의한 부숙도가 부숙후기만 되

어도 퇴비로 사용 및 판매가 가능하다고 알려져 있다. 온도에 따른 부숙정도는 온도에 관계 없이 유사하였다 (Table 3-5).

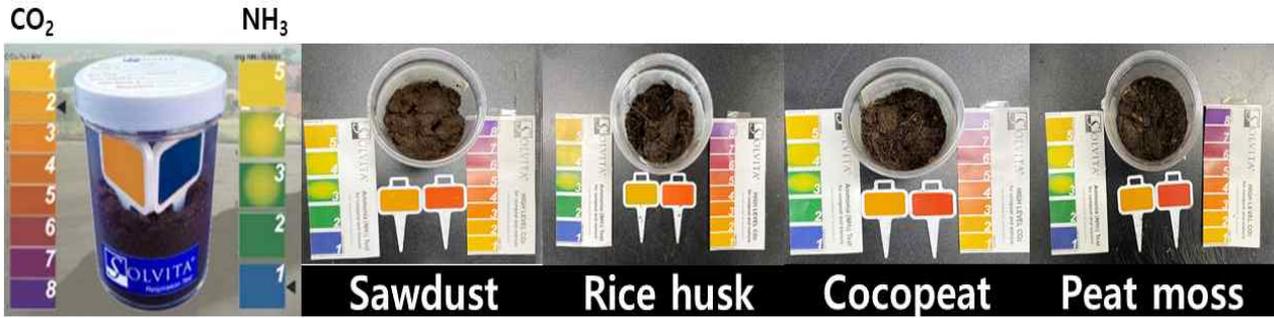


Fig. 3-13. 솔비타법을 이용한 부숙도 시험결과.

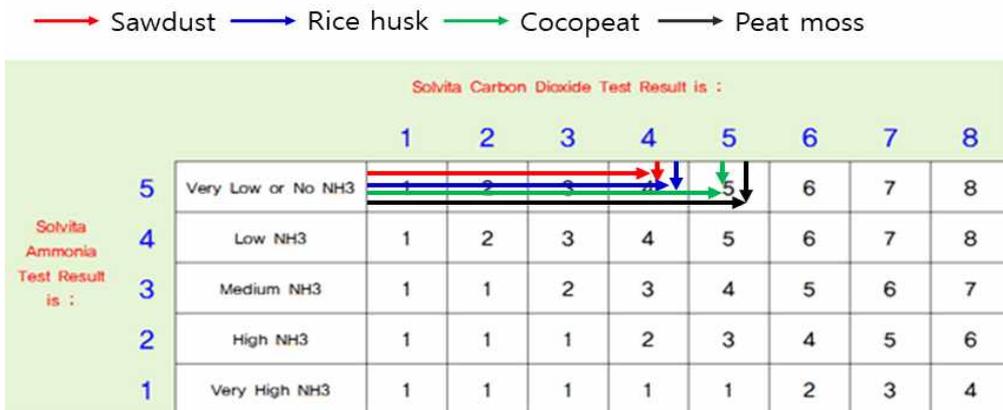


Fig. 3-14. 다양한 수분조절재의 부숙도 판정 결과.

Table 3-5. 수분조절재 종류에 따른 온도별 퇴비 부숙도 판정 결과

Treatment	Temp.	60 day
	(°C)	Solvita
Sawdust	25	4
	35	4
	45	4
	55	4
Rice husk	25	4
	35	4
	45	4
	55	4
Cocopeat	25	5
	35	5
	45	5
	55	5
Peat moss	25	5
	35	5
	45	5
	55	5
Index	판정기준 1:미부숙, 2:부숙초기, 3:부숙중기, 4~6:부숙후기, 7~8:부숙완료	

수분조절재 및 온도에 따른 퇴비의 염분함량은 퇴비화 시작 후 30일 및 60일로 구분하여 수행되어졌으며, 그 결과는 Table 3-6에서 보는 바와 같다. 원시료인 우분뇨의 염분 함량은 2.04%로 가축분퇴비 공정규격 (2%이하) 보다 높았으나 다양한 수분조절재가 첨가됨에 염분의 함량은 감소되었고, 퇴비화 시작 후 30일부터 염분함량 기준은 만족한다는 것을 알 수 있었다. 특히 우분퇴비에 염분함량이 높는데, 이는 소의 오줌 자체에 염분이 많이 포함되어 있기 때문이다. 이를 어떠한 처리하지 않고 농경지에 시용 시 높은 염분함량으로 인하여 작물의 장애를 유발하게 되고, 상품 수량을 현저히 감소시키는 결과를 초래할 수 있다. 이와 같이 우분뇨를 농경지의 퇴비로 재활용하기 위해서는 반드시 수분조절재를 첨가하여 가축분 퇴비 공정규격에 제시된 염분함량 이하로 맞추어야 할 것이다.

Table 3-6. 수분조절재 종류 및 온도에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	Temp.	30 day	60 day
	(°C)	----- (%) -----	
Sawdust	25	1.97	1.96
	35	1.91	1.97
	45	1.94	1.96
	55	1.93	1.90
Rice husk	25	2.03	1.94
	35	1.95	1.95
	45	1.95	1.92
	55	1.94	1.96
Cocopeat	25	1.86	1.84
	35	1.89	1.94
	45	1.93	1.90
	55	1.95	1.92
Peat moss	25	1.93	1.83
	35	1.94	1.91
	45	1.89	1.96
	55	1.94	1.94
Index	2% 이하		

수분조절재 종류 및 온도에 따라 생산된 퇴비의 무기성분 함량은 Table 3-7에서 보는 것과 같다. K, Ca, Mg, Na 및 P₂O₅의 함량은 각각 4.51-4.91, 2.10-2.47, 0.70-0.93, 0.59-0.71 및 2.18-2.64 mg/g의 범위로 수분조절재 및 보관 온도에 따라 유의적인 차이를 나타내지 않았다.

수분조절재 종류 및 온도에 따라 생산된 퇴비의 유해성분 함량을 조사한 결과 다른 유해성분에 비해 아연의 농도가 높기는 하였으나 가축분퇴비 공정규격에 적합하였으며, 다른 유해성분 함량도 수분조절재 및 온도에 따라 약간 차이가 있기는 하였으나 모두 가축분퇴비 공정규격을 만족하였다 (Table 3-8). 앞서 언급된 수분조절재의 유해성분 함량은 대부분 미량 또는 검출한계 이하로 존재하였는데, 퇴비화 과정 후 유해성분 함량이 증가한 것은 원시료인 우분뇨에 지배적인 영향을 받은 것으로 판단된다.

Table 3-7. 수분조절재 종류 및 온도에 따라 제조된 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	Temp. (°C)	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
Sawdust	25	4.51	2.22	0.72	0.62	2.20
	35	4.56	2.16	0.73	0.63	2.18
	45	4.51	2.22	0.72	0.62	2.28
	55	4.91	2.13	0.71	0.67	2.30
Rice husk	25	4.45	2.10	0.74	0.67	2.25
	35	4.49	2.25	0.77	0.65	2.33
	45	4.45	2.10	0.74	0.67	2.64
	55	4.38	2.19	0.93	0.92	2.33
Cocopeat	25	4.67	2.16	0.70	0.63	2.35
	35	4.60	2.10	0.72	0.69	2.32
	45	4.67	2.16	0.70	0.63	2.45
	55	4.76	2.35	0.79	0.67	2.42
Peat moss	25	4.62	2.39	0.73	0.59	2.30
	35	4.51	2.47	0.72	0.71	2.20
	45	4.75	2.39	0.73	0.59	2.24
	55	4.60	2.95	0.85	0.60	2.26

Table 3-8. 수분조절재 종류에 따른 온도별 최종 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	Temp. (°C)	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Sawdust	25	44.1	ND	25.5	125.5	13.5	16.5	427.5	ND
	35	44.3	1.50	18.5	243.0	11.5	18.5	398.5	ND
	45	43.6	ND	25.5	125.5	13.5	16.5	427.5	ND
	55	42.5	0.50	17.0	95.5	9.0	15.0	353.0	ND
Rice husk	25	43.5	0.50	22.5	84.0	13.5	11.5	361.0	ND
	35	42.1	ND	22.5	80.5	13.0	15.0	358.5	ND
	45	41.5	0.50	22.5	84.0	13.5	11.5	361.0	ND
	55	31.5	ND	27.0	95.5	14.0	19.0	485.5	ND
Cocopeat	25	38.6	1.00	19.0	82.0	9.5	15.0	375.0	ND
	35	33.5	1.00	27.0	91.0	15.5	15.0	371.5	ND
	45	34.2	1.00	19.0	82.0	9.5	15.0	375.0	ND
	55	25.0	1.00	19.5	91.5	10.5	14.5	392.5	ND
Peat moss	25	35.2	0.50	24.5	82.0	11.5	19.0	334.5	ND
	35	32.5	ND	43.0	87.0	19.5	14.5	386.5	ND
	45	40.6	0.50	24.5	82.0	11.5	19.0	334.5	ND
	55	38.4	ND	42.0	81.0	17.5	11.0	330.0	ND
Index		45	5	200	360	45	130	900	2

(나) 수분조절재 및 보조제들의 성형조건에 따른 최적화

① 수분조절재 크기

수분조절재의 크기에 따른 퇴비화 특성과 최종 제조된 퇴비 품질을 평가하기 위한 실험은 톱밥을 대조구로 하여 코코피트와 피트모스를 원재료 형태와 분말화한 조건으로 구분하여 조사하였다. 코코피트 및 피트모스의 원재료를 사용하나 그것들을 분말화한 것을 사용하나 퇴비화 특성 및 최종 제조된 퇴비 품질에는 큰 영향을 미치지 않았다. 이와 같이 가축분 퇴비 생산을 위한 수분조절재로서 코코피트 및 피트모스의 적용은 원재료에서부터 분말화된 시료까지 광범위한 범위로 적용될 수 있을 것이다. 하지만 분말화된 시료는 입경이 너무 작아 시료가 서로 뭉쳐질 수 있고, 그로 인한 퇴비더비가 눌러져 통기성이 불량해질 수 있다. 이에 비교적 입경이 큰 코코피트나 피트모스를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다 (Fig. 3-15 및 Table 3-9~12).

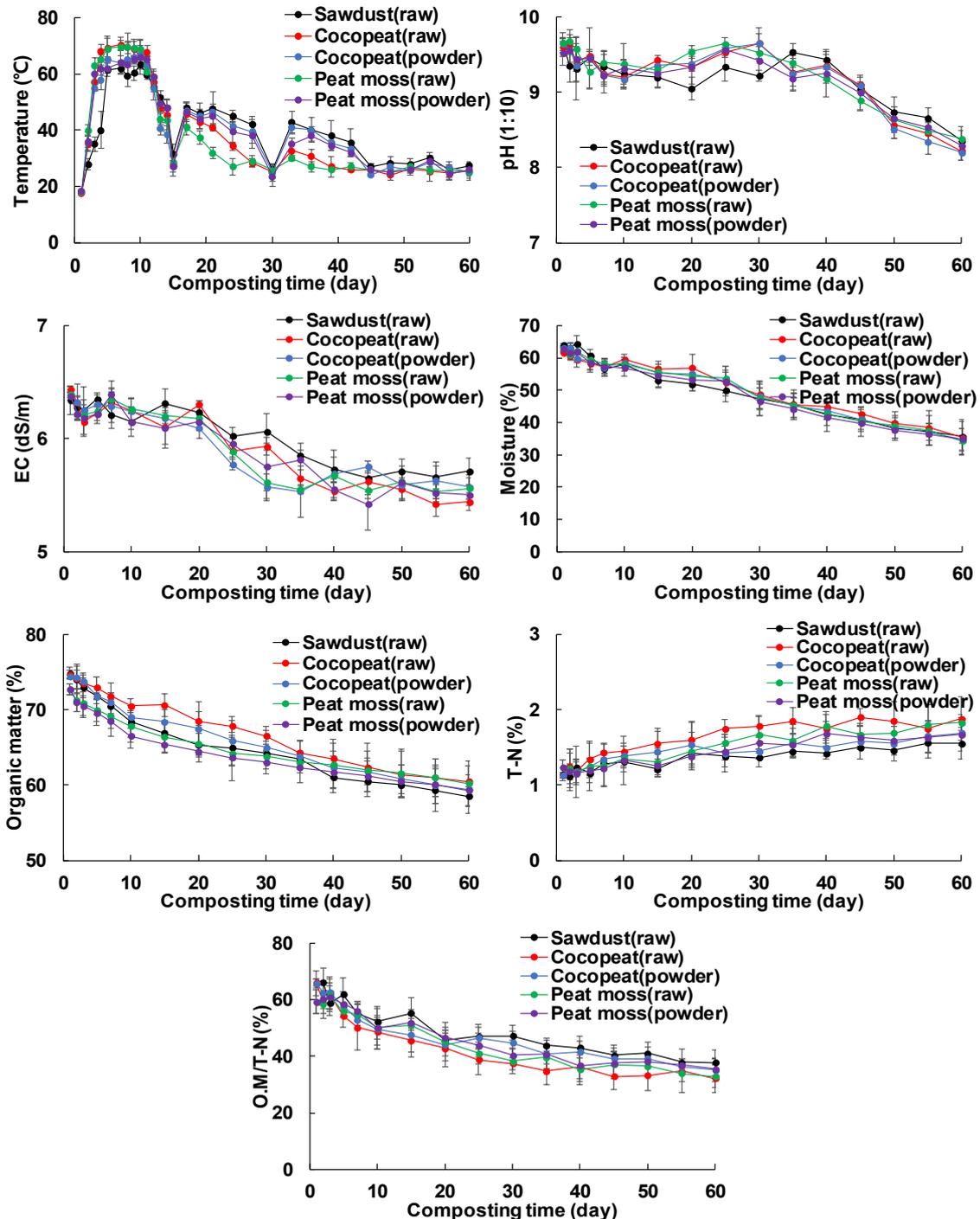


Fig. 3-15. 수분조절재 크기에 따른 퇴비화 특성.

Table 3-9. 수분조절재 크기에 따른 퇴비 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 60 days after treatment	
Sawdust(raw)	4	
Cocopeat(raw)	5	
Cocopeat(powder)	5	
Peat moss(raw)	5	
Peat moss(powder)	5	

Table 3-10. 수분조절재 입자 크기에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
Sawdust(raw)	1.97	1.96
Cocopeat(raw)	1.86	1.84
Cocopeat(powder)	1.89	1.90
Peat moss(raw)	1.93	1.83
Peat moss(powder)	1.92	1.88

Table 3-11. 수분조절재 입자 크기에 따른 최종 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	(%)				
Sawdust(raw)	4.51	2.22	0.72	0.62	2.20
Cocopeat(raw)	4.67	2.16	0.70	0.63	2.17
Cocopeat(powder)	4.54	2.23	0.68	0.64	2.09
Peat moss(raw)	4.45	2.39	0.73	0.59	2.11
Peat moss(powder)	4.34	2.31	0.70	0.58	2.04

Table 3-12. 수분조절재 입자 크기에 따른 최종 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	(mg/kg)							
Sawdust(raw)	44.1	1.0	25.5	125.5	13.5	16.5	427.5	ND
Cocopeat(raw)	38.6	ND	19.0	82.0	9.5	15.0	375.0	ND
Cocopeat(powder)	39.5	ND	21.5	92.5	10.5	14.6	354.2	ND
Peat moss(raw)	35.2	ND	24.5	82.0	11.5	19.0	334.5	ND
Peat moss(powder)	39.6	0.5	22.6	78.5	12.6	15.4	323.5	ND

② BPP-BA 적용비율 및 크기

BPP-BA (BC)를 보조제로 적용하여 수분조절재의 비용을 절감하고 기능적인 면을 보완하고자 하였다. 특히 본 연구에서는 퇴비화 효율이 가장 좋았던 피트모스에 BPP-BA를 일정비율로 혼합하여 적용비율을 선정하였고, BPP-BA의 적용조건을 확립하기 위하여 입상형 및 분상형으로 제형조건을 달리하여 코코피트 (CP) 및 피트모스(PM)와 혼합하여 퇴비화 실험을 수행하였다. BPP-BA를 피트모스 중량의 10:0, 9:1, 8:2 및 6:4비로 혼합하여 깔짚소재를 제조하였으며, 이들을 가축분뇨와 혼합하여 퇴비화 효율을 평가하였다 (Fig. 3-16 및 Fig. 3-17). 피트모스에 바이오차가 주입됨에 따라 퇴비화 시작 6일 후에 온도가 65℃까지 급격하게 증가하기 시작하였으며, 그 이후로도 피트모스만 주입된 퇴비더미의 온도보다 높은 온도를 유지하였다. 뿐만 아니라 퇴비화 과정동안 수분함량도 증가하였는데, 이는 바이오차가 수분을 보유하는 능력이 높기 때문이다. 일반적으로 피트모스는 송풍과정 동안 증발산량이 많은데 비하여 바이오차는 피트모스에 비해 비교적 증발산량이 작기 때문에 피트모스에 일정량의 바이오차를 혼합하여 퇴비화할 시 수분 함량이 증가된 것으로 판단된다. pH의 경우 퇴비화 초기 약간 감소하는 경향이었으나 15일 이후부터 증가하였고, 다시 퇴비화 30일쯤 pH는 다시 감소하기 시작하였다. EC 함량의 경우 퇴비화 시작 후 20일 동안 비교적 일정하게 유지되다 20일 이후에서부터 급격히 감소하기 시작하였으며, 30일 이후에는 비교적 일정한 EC를 유지하였다. 하지만 피트모스만 사용된 퇴비 보다 일정량의 BPP-BA를 혼합하였을 시 EC 함량이 감소되었고, 피트모스와 BPP-BA를 8:2로 혼합하여 퇴비화한 퇴비의 EC 함량이 가장 낮았다. 피트모스 및 BPP-BA의 혼합비율에 따라 제조된 퇴비의 유기물 함량은 BPP-BA의 수준이 증가함에 따라 증가하는 경향이였다. 질소의 함량은 퇴비화 기간이 경과함에 따라 증가하는 경향이었고 피트모스와 BPP-BA의 혼합비율에 따라서는 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 유기물대 질소의 비는 반응 초기 피트모스와 BPP-BA의 혼합비율에 따라 약간 상이한 차이를 보였으나 퇴비화 기간이 후반부로 갈수록 모든 처리구의 유기물대 질소의 비는 비슷한 수준을 유지하였다. 이와 같은 피트모스와 BPP-BA의 혼합비율에 따른 퇴비화 특성 결과, 피트모스에 바이오차를 추가하여 가축분뇨를 퇴비화 하였을 때, 바이오차의 물리화학적 기능적인 특성이 미생물의 활성을 촉진시키고, 결과적으로 가축분뇨내 유기물의 분해를 가속화하여 우수한 품질의 퇴비를 생산할 것으로 기대되어졌다 (Table 3-13~16). 실제 피트모스와 BPP-BA를 혼합하여 가축분뇨를 퇴비화하였을 때 최종 생산된 퇴비의 부숙도는 순수한 피트모스만 처리되었을 때보다 향상되었으며, 품질 또한 향상된 결과를 보였다.

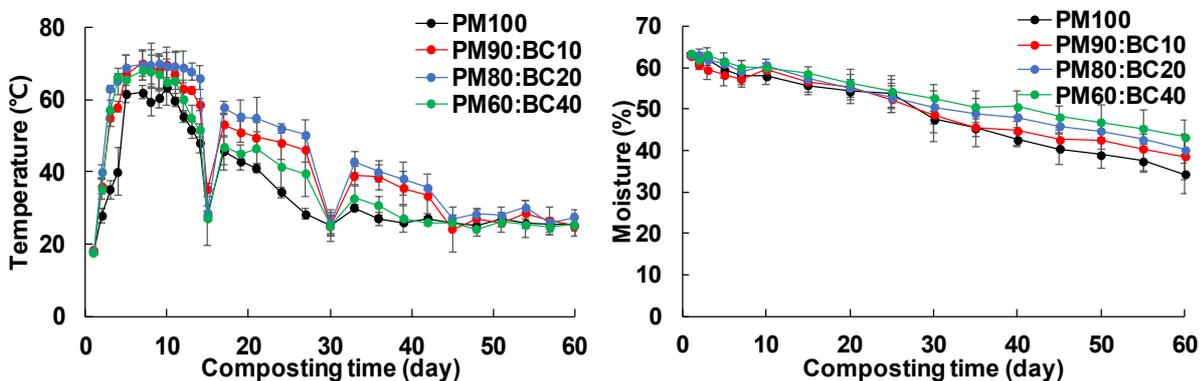


Fig. 3-16. 피트모스와 BPP-BA 혼합비율에 따른 퇴비화 과정 중 온도 및 수분함량 변화.

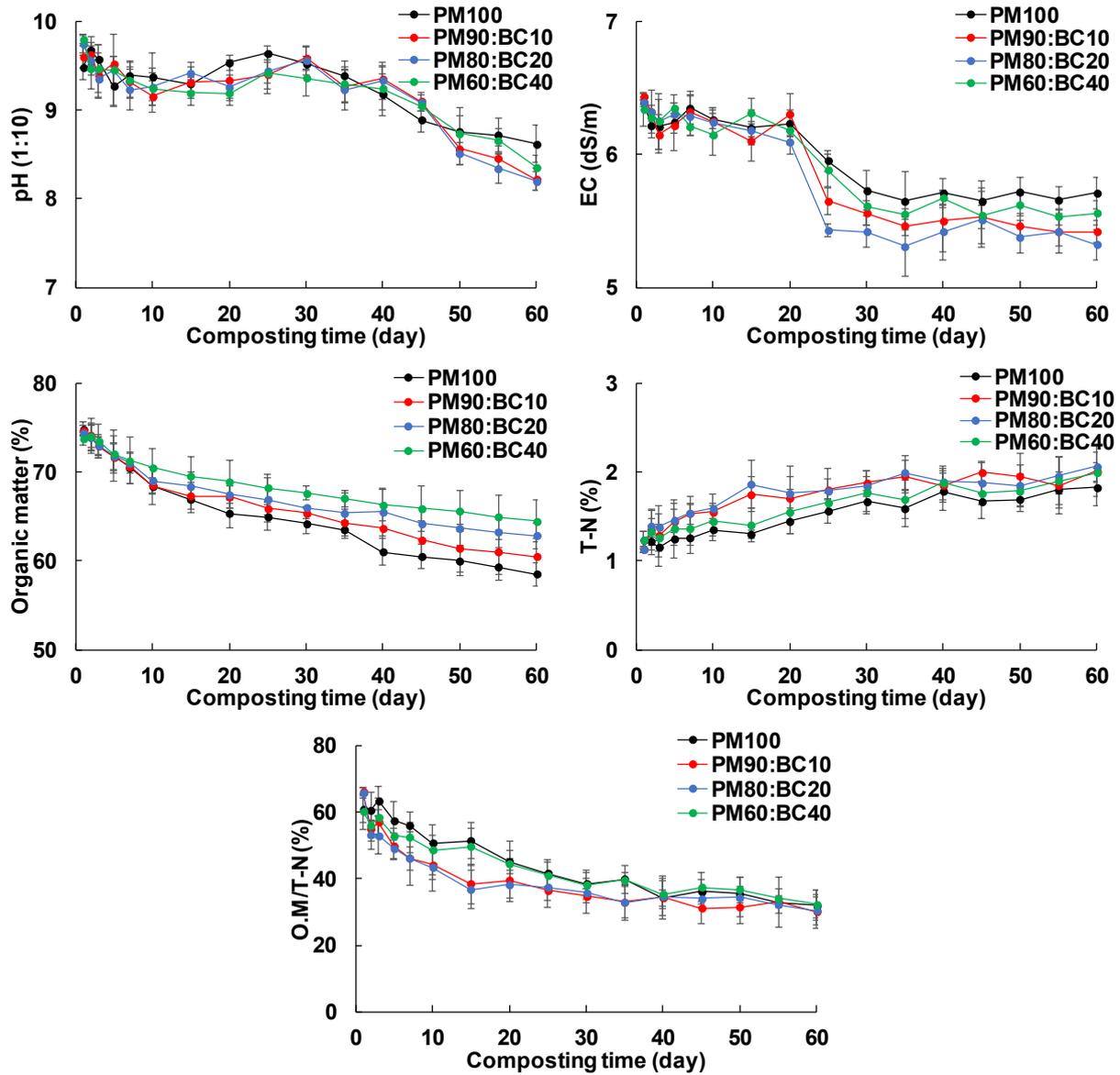


Fig. 3-17. 피트모스와 BPP-BA 혼합비율에 따른 퇴비화 과정 중 유기물, 질소 및 유기물/질소비 변화.

Table 3-13. 퇴비화 중 Biochar 첨가량에 따른 퇴비 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 60 days after treatment	
PM100	5	
PM90:BC10	6	
PM80:BC20	6	
PM60:BC40	5	

Table 3-14. 퇴비화 중 Biochar 첨가량에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
PM100	1.93	1.83
PM90:BC10	1.95	1.92
PM80:BC20	1.93	1.93
PM60:BC40	1.96	1.95

Table 3-15. Biochar 첨가량에 따른 최종 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	----- (%) -----				
PM100	4.51	2.22	0.72	0.62	2.20
PM90:BC10	4.66	2.73	0.84	0.70	2.33
PM80:BC20	4.95	2.61	0.88	0.77	2.75
PM60:BC40	4.71	2.32	0.75	0.67	2.32

Table 3-16. Biochar 첨가량에 따른 최종 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
PM100	42.0	1.0	25.5	125.5	13.5	16.5	427.5	ND
PM90:BC10	35.0	ND	27.0	85.0	15.5	12.5	368.0	ND
PM80:BC20	34.2	ND	21.0	105.5	10.0	16.5	465.5	ND
PM60:BC40	40.5	ND	19.5	83.0	14.0	6.0	397.5	ND

피트모스와 BPP-BA의 혼합비율을 8:2로 고정하고, 여기에 BPP-BA의 제형을 입상형과 분말형으로 구분하여 가축분뇨를 퇴비화 하였을 때, 퇴비화 특성과 최종 제조된 퇴비의 품질을 평가한 결과는 Fig. 3-18 및 Table 3-17~20에서 보는 것과 같다. 전반적인 퇴비화 특성은 입상형 BPP-BA가 분말형 BPP-BA에 비해 우수한 퇴비화 특성을 보였으나 최종적으로 생산된 퇴비의 품질특성은 입상형 BPP-BA이나 분말형 BPP-BA나 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 하지만 대규모 시험에서 다량의 분말형 BPP-BA가 투입될 경우 입자들간 뭉치는 현상으로 인하여 투수성 및 통기성이 불량하게 될 것이며 우수한 품질의 퇴비를 제조하는 것은 제한적일 것이다. 그래서 본 연구진은 피트모스에 BPP-BA를 혼합하되 입상형으로 사용하는 것이 효율적일 것이라 판단하였다.

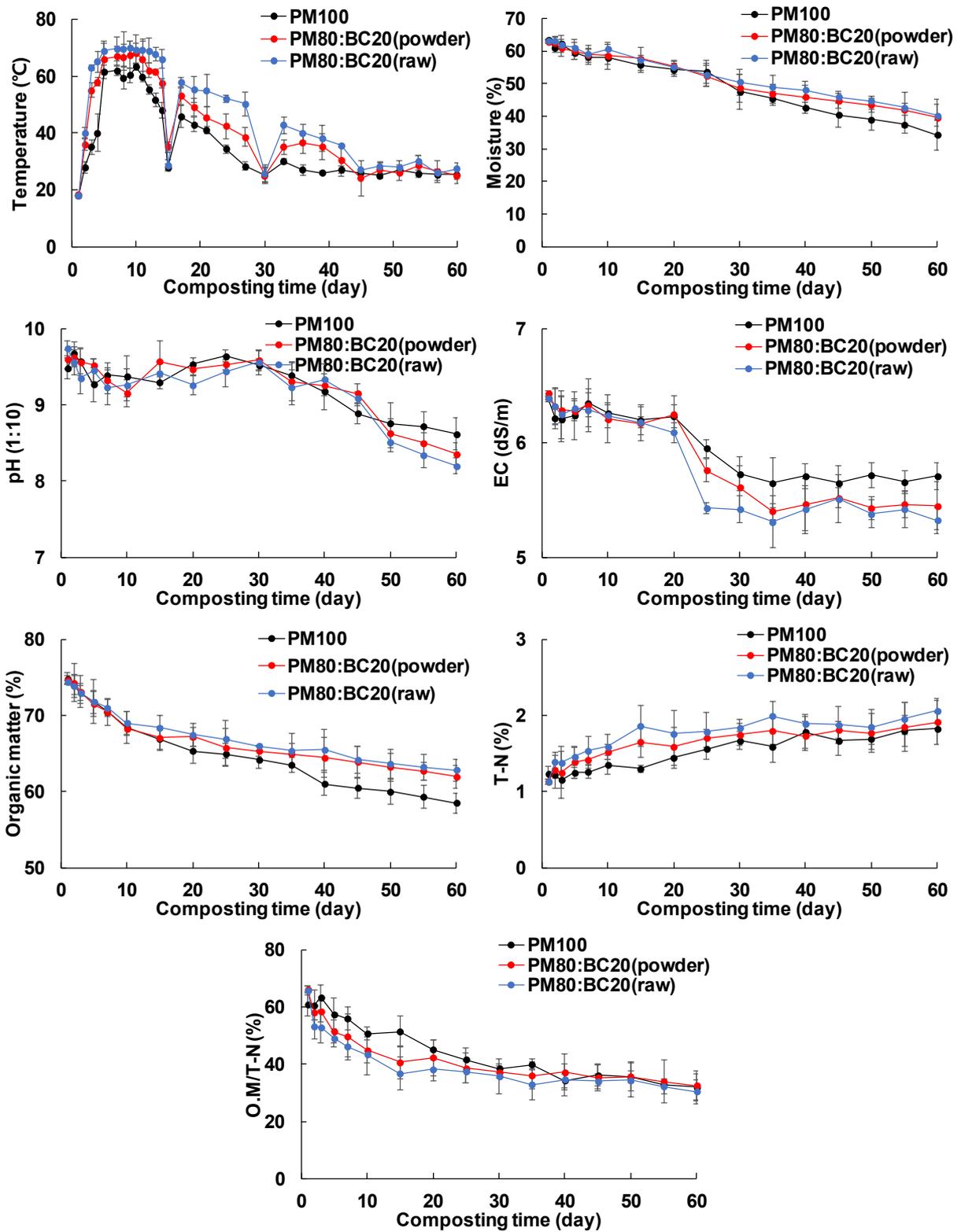


Fig. 3-18. 피트모스에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비화 특성.

Table 3-17. 피트모스에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 60 days after treatment	
PM100	5	
PM80:BC20(powder)	6	
PM80:BC20(raw)	6	

Table 3-18. 피트모스에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
PM100	1.93	1.83
PM80:BC20(powder)	1.94	1.94
PM80:BC20(raw)	1.93	1.93

Table 3-19. 피트모스에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	----- (%) -----				
PM100	4.51	2.22	0.72	0.62	2.20
PM80:BC20(powder)	4.65	2.40	0.84	0.68	2.47
PM80:BC20(raw)	4.95	2.61	0.88	0.77	2.75

Table 3-20. 피트모스에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
PM100	42.0	1.0	25.5	125.5	13.5	16.5	427.5	ND
PM80:BC20(powder)	36.0	ND	31.0	101.0	13.5	23.0	413.5	ND
PM80:BC20(raw)	34.2	ND	21.0	105.5	10.0	16.5	465.5	ND

추가적으로 깔짚 소재의 다양성을 확보하고, 본 연구에서 제시된 최적조건이 다른 수분조절재에도 동일하게 적용되는지 여부를 판단하기 위하여 피트모스 대신 코코피트를 수분조절재로 하고 BPP-BA를 8:2로 혼합하되 BPP-BA를 입상형 및 분말형으로 제형화하여 가축분뇨 퇴비화 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 3-19 및 Table 3-21~24 에서 보는 것과 같이 앞서 언급된 피트모스의 결과와 큰 차이가 없었다.

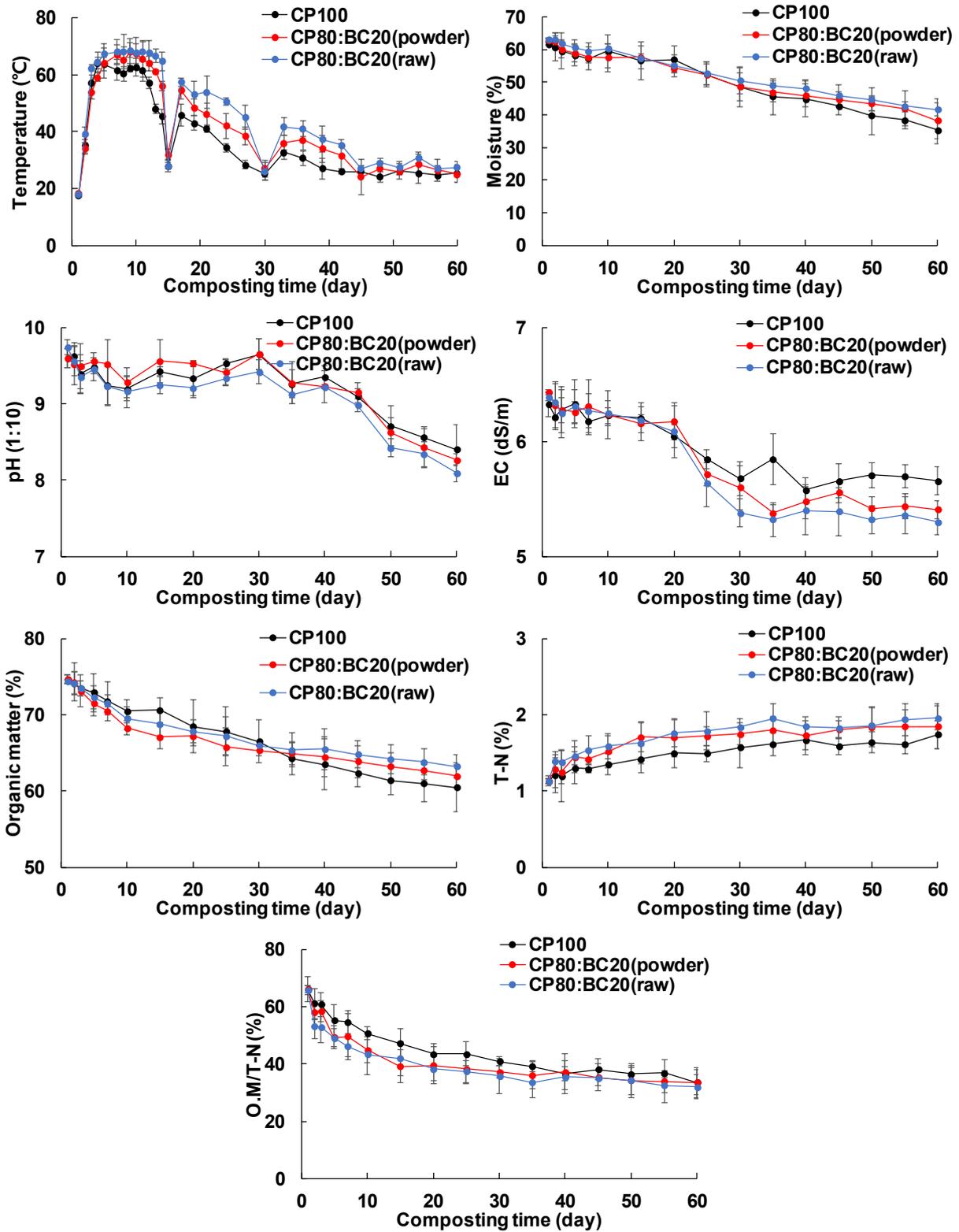


Fig. 3-19. 코코피트에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비화 특성.

Table 3-21. 코코피트에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 60 days after treatment	
CP100	5	
CP80:BC20(powder)	6	
CP80:BC20(raw)	6	

Table 3-22. 코코피트에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
CP100	1.89	1.86
CP80:BC20(powder)	1.95	1.89
CP80:BC20(raw)	1.96	1.93

Table 3-23. 코코피트에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	----- (%) -----				
CP100	4.60	2.10	0.72	0.69	2.41
CP80:BC20(powder)	4.64	2.17	0.71	0.74	2.30
CP80:BC20(raw)	4.84	2.77	0.83	0.69	2.40

Table 3-24. 코코피트에 입상형 및 분말형 BPP-BA 혼합에 따른 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
CP100	33.5	1.0	27.0	91.0	15.5	15.0	371.5	ND
CP80:BC20(powder)	32.9	ND	18.5	80.0	9.0	15.5	347.5	ND
CP80:BC20(raw)	33.8	ND	25.0	78.5	13.5	20.5	347.0	ND

③ 미생물 제형

축사바닥 깔짚소재 개발을 위한 최적 미생물 제형을 선택하기 위하여 미생물 제형을 액상 (liquid) 및 고상 (solid)으로 분리하여 피트모스:BPP-BA가 8:2로 혼합된 깔짚의 부피대비 3%를 접종한 후 가축분뇨 퇴비를 제조하였으며, 그 결과는 Fig. 3-20 및 Table 3-25~28에서 보

는 바와 같다. 피트모스와 BPP-BA만 혼합한 깔짚에 비해 미생물을 접종하였을 때, 퇴비화 특성이 향상되었으며, 최종 생산된 퇴비품질 또한 향상된 결과를 보였다. 특히, 액상형을 넣었을 때 부숙이 활성화되어 2일만에 65°C에 도달하였으며 15일차 뒤집기 이후 온도가 크게 상승하고 유기물 분해가 완료되어 온도가 빠르게 감소하였다. 고상형은 고온 유지가 더 길었으며 액상형에 비해 부숙 촉진 효과가 떨어졌다. 액상 미생물이 투입됨으로써 초기 수분함량은 증가하였지만 감소폭은 다른 처리구와 동일하였다.

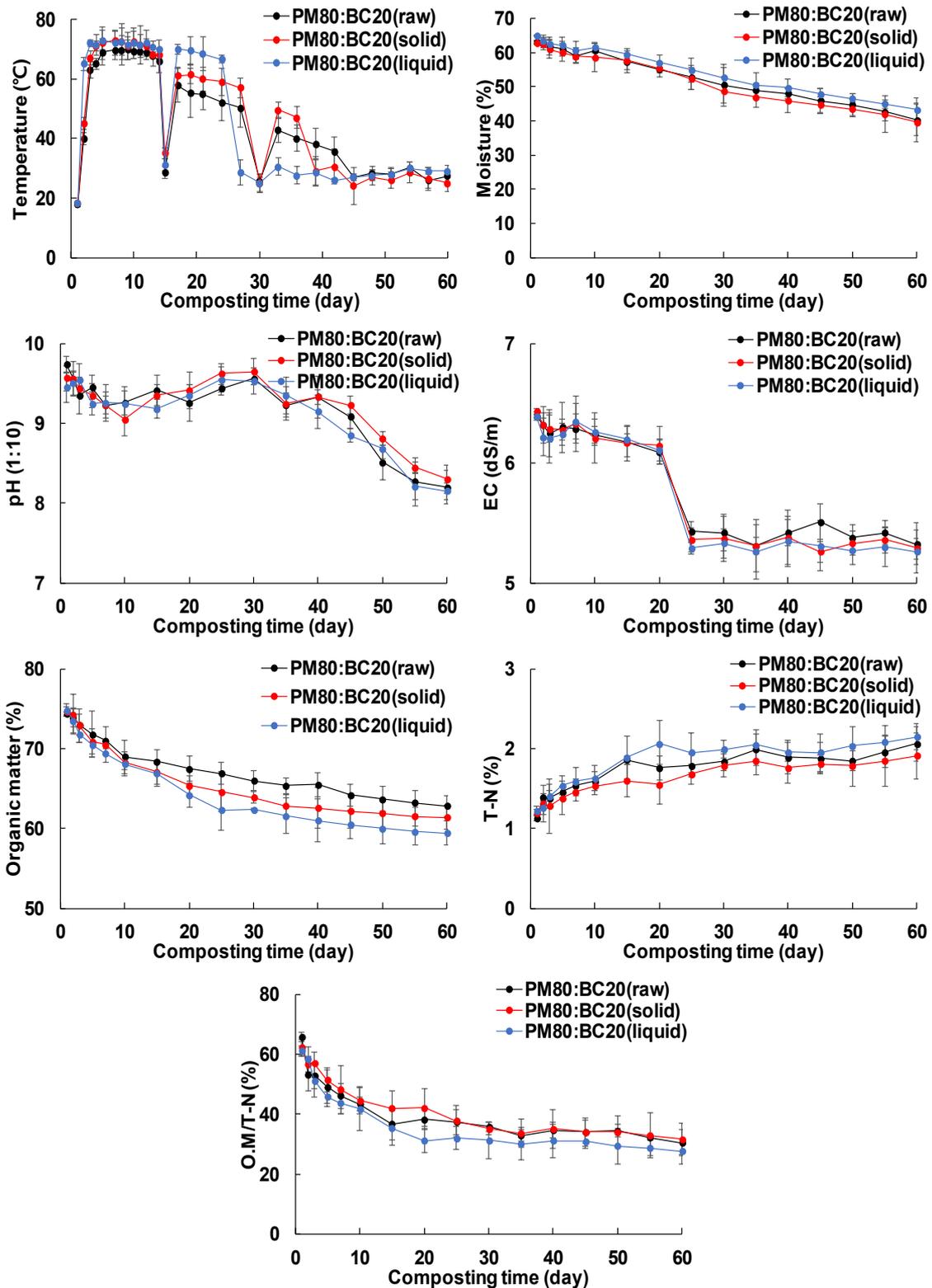


Fig. 3-20. 미생물제 제형화에 따른 퇴비화 특성변화.

Table 3-25. 미생물제 제형화에 따른 퇴비 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 60 days after treatment	
PM80:BC20(raw)	6	
PM80:BC20(solid)	6	
PM80:BC20(liquid)	7	

Table 3-26. 미생물제 제형화에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	염분(%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
PM80:BC20(raw)	1.93	1.93
PM80:BC20(solid)	1.87	1.85
PM80:BC20(liquid)	1.85	1.88

Table 3-27. 미생물제 제형화에 따른 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	(%)				
PM80:BC20(raw)	4.95	2.61	0.88	0.77	2.75
PM80:BC20(solid)	5.00	2.84	0.93	0.92	2.64
PM80:BC20(liquid)	5.71	2.71	0.92	0.87	2.82

Table 3-28. 미생물제 제형화에 따른 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	(mg/kg)							
PM80:BC20(raw)	34.2	ND	21.0	105.5	10.0	16.5	465.5	ND
PM80:BC20(solid)	31.5	ND	27.0	95.5	14.0	19.0	485.5	ND
PM80:BC20(liquid)	30.9	ND	29.0	102.0	14.5	17.5	460.0	ND

입상형 미생물제의 효율을 극대화하기 위하여 입상형 (granule)을 분말화 (powder)하였으며, 분말화된 미생물제를 피트모스와 BPP-BA가 혼합된 깔짚의 부피대비 3% 적용하여 가축분뇨 퇴비화 실험을 수행한 결과는 Fig. 3-21 및 Table 3-29~32에서 보는 바와 같이 입상형이나 분말형에 따라 퇴비화 특성 및 최종 제조된 퇴비의 품질은 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 이상의 결과를 미루어볼 때, 고효율의 축사바닥 깔짚 소재를 개발하기 위한 미생물제는 액상으로 접종하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

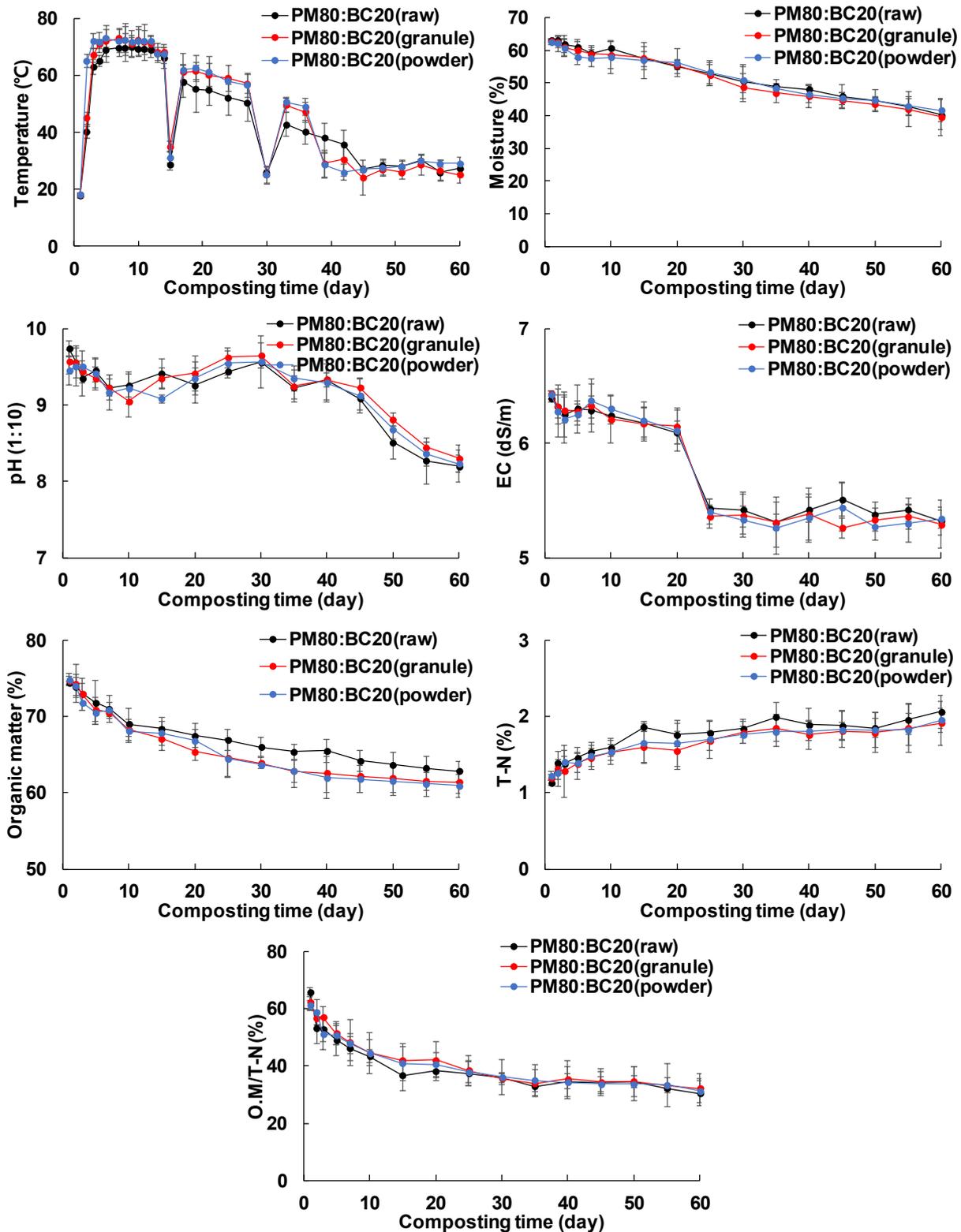


Fig. 3-21. 입상형 및 분상형 미생물제 처리에 따른 퇴비화 특성변화.

Table 3-29. 미생물제 제형화에 따른 퇴비 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 60 days after treatment	
PM80:BC20(raw)	6	
PM80:BC20(granule)	6	
PM80:BC20(powder)	6	

Table 3-30. 미생물제 제형화에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
PM80:BC20(raw)	1.93	1.93
PM80:BC20(granule)	1.87	1.85
PM80:BC20(powder)	1.89	1.86

Table 3-31. 미생물제 제형화에 따른 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	(%)				
PM80:BC20(raw)	4.95	2.61	0.88	0.77	2.75
PM80:BC20(granule)	5.00	2.84	0.93	0.92	2.64
PM80:BC20(powder)	5.10	2.40	0.79	0.79	2.37

Table 3-32. 미생물제 제형화에 따른 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	(mg/kg)							
PM80:BC20(raw)	34.2	ND	21.0	105.5	10.0	16.5	465.5	ND
PM80:BC20(granule)	31.5	ND	27.0	95.5	14.0	19.0	485.5	ND
PM80:BC20(powder)	32.5	0.5	22.0	102.0	12.0	12.5	396.0	ND

(다) 수분조절재 및 보조제들의 최적 혼합비율 결정

① 수분조절재:BPP-BA:미생물제 혼합비율 (수분조절재 및 BPP-BA 혼합비율)

깔짚 소재로 피트모스와 BPP-BA를 8:2의 비로 혼합하였을 때, 피트모스의 부숙 촉진 능력은 뛰어나지만 피트모스가 보유하고 있는 수분 함량이 높아 수분조절재로써 수분을 조절하는 기능이 다소 떨어지는 것으로 보인다. 반면에 코코피트와 BPP-BA를 8:2의 비로 혼합하였을 때, 코코피트의 수분조절능력은 뛰어나지만 코코피트의 퇴비 부숙을 촉진하는 능력에 부족함이 있어 깔짚으로 사용하기에 어려움이 있을 것으로 보인다. 따라서 부숙촉진 효과가 뛰어난 피트모스와 수분조절 효과가 뛰어난 코코피트를 일정 비율로 혼합하여 깔짚으로 활용해보고자 하였다. 따라서 피트모스:코코피트:BPP-BA의 비를 6:2:2, 4:4:2, 2:6:2로 혼합하여 각각의 퇴비화 효율을 확인하였다 (Fig. 3-22, 3-23 및 Table 3-33~36).

퇴비화 온도의 상승은 피트모스:코코피트:BPP-BA의 비가 6:2:2 및 4:4:2일 때 70℃까지 도달하였으며, 2:6:2일 때는 64℃까지만 상승하였다. 이는 2:6:2의 혼합 깔짚에서 퇴비화 효율이 떨어지는 것을 의미한다. 6:2:2로 혼합된 깔짚에서 고온이 길게 유지되고 퇴비화 15일차의 뒤집기 이후에 가장 높게 온도가 상승한 것과 유기물 함량이 다른 처리구들에 비해 가장 크게 감소한 것을 보아 유기물의 분해가 잘 이루어졌으며 부숙이 가장 촉진된 것으로 보인다. 또한 최종 퇴비의 무기성분 함량이 다른 처리구들에 비해 높게 나타나 퇴비로 사용하기에 가장 적합할 것으로 판단된다. 기타 유해성분 및 이화학적 특성은 모든 처리구에서 퇴비품질공정규격을 만족하였다.

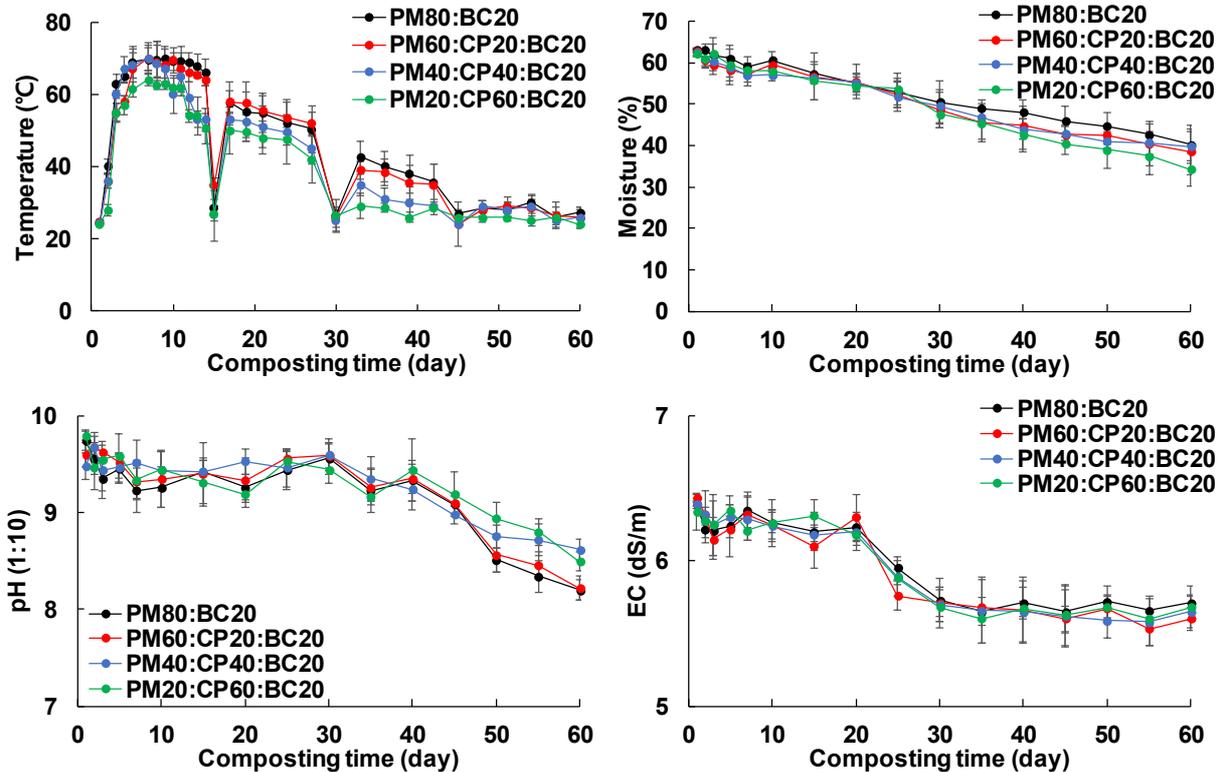


Fig. 3-22. 피트모스 및 코코피트 혼합비율에 따른 퇴비화 특성 변화.

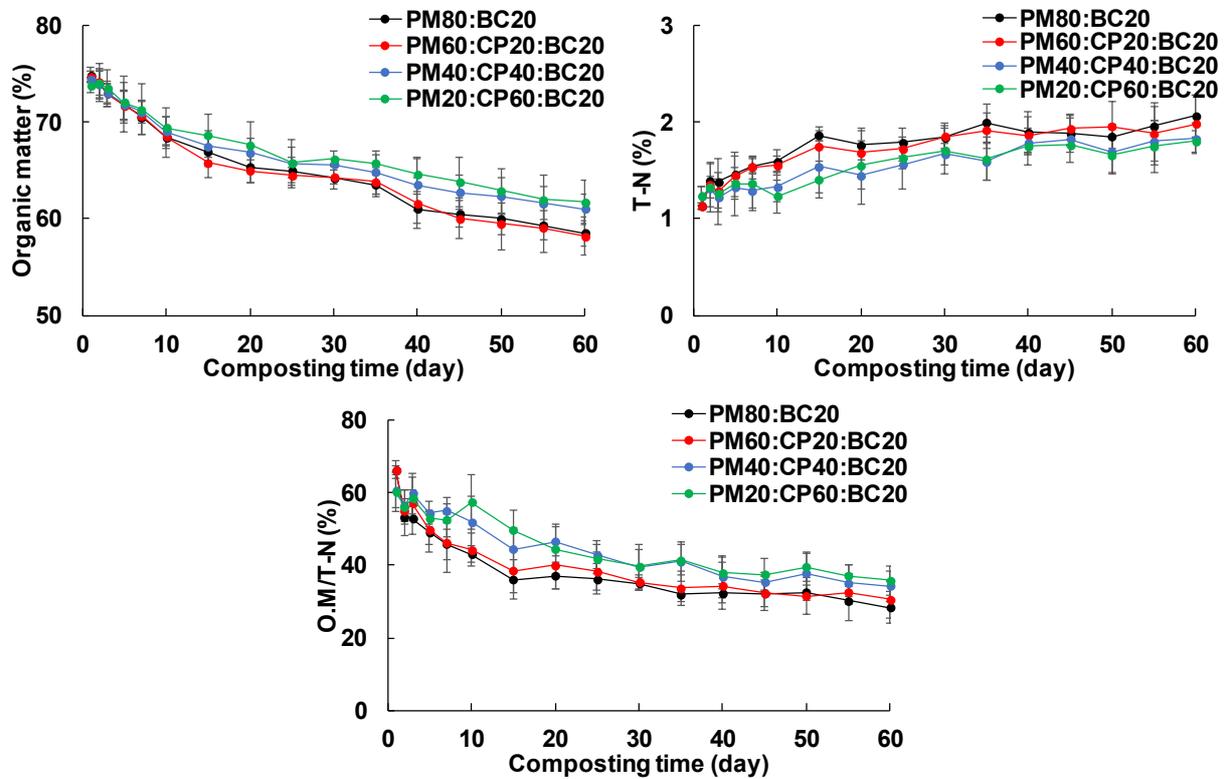


Fig. 3-23. 피트모스 및 코코피트 혼합비율에 따른 퇴비화 특성 변화.

Table 3-33. 피트모스 및 코코피트 혼합비율에 따른 퇴비 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 60 days after treatment	
PM80:BC20	6	
PM60:CP20:BC20	6	
PM40:CP40:BC20	6	
PM20:CP60:BC20	6	

Table 3-34 피트모스 및 코코피트 혼합비율에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
PM80:BC20	1.93	1.93
PM60:CP20:BC20	1.94	1.91
PM40:CP40:BC20	1.93	1.92
PM20:CP60:BC20	1.96	1.94

Table 3-35. 피트모스 및 코코피트 혼합비율에 따른 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	----- (%) -----				
PM80:BC20	4.95	2.61	0.88	0.77	2.75
PM60:CP20:BC20	5.20	2.67	0.85	0.80	2.53
PM40:CP40:BC20	4.85	2.10	0.74	0.67	2.25
PM20:CP60:BC20	4.78	2.55	0.80	0.68	2.27

Table 3-36. 피트모스 및 코코피트 혼합비율에 따른 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
PM80:BC20	34.2	0.0	21.0	105.5	10.0	16.5	465.5	ND
PM60:CP20:BC20	24.5	1.0	23.5	105.5	11.0	15.5	415.5	ND
PM40:CP40:BC20	35.6	0.5	22.5	84.0	13.5	11.5	361.0	ND
PM20:CP60:BC20	32.8	0.5	28.0	110.5	14.0	18.0	370.0	ND

② 수분조절재:BPP-BA:미생물제 혼합비율(미생물제 혼합비율)

상기 ①에서 퇴비화 효율이 가장 뛰어난 최적 혼합비율인 피트모스:코코피트:BPP-BA = 6:2:2의 비로 혼합한 깔짚(CPB)만을 사용하여 실험을 수행하였으며, 미생물 균주는 *Bacillus subtilis* (B), *Lactobacillus sakei* (L) 및 *Sacchromyces cerevisiae* (S)를 단일 및 각각의 균주를 1:1:1의 비로 혼합(BLS)하여 사용하였다. 미생물제는 혼합된 깔짚 소재 부피 대비 3%를 첨가하였다.

퇴비화 온도는 단일 균주를 사용한 처리구는 퇴비화 5일차에 70℃ 고온부에 도달하였고 모두 유사한 경향의 온도 변화를 보였으며 미생물을 첨가하지 않은 처리구와 유의적인 차이가 나타나지 않았다 (Fig. 3-24). 하지만 혼합균주를 사용한 처리구에서는 퇴비화가 촉진되어 3일차에 온도가 72℃에 도달하였으며 24일차까지 고온이 유지되다가 27일차에 상온으로 떨어져 부숙이 완료된 것으로 보였다. 혼합균주를 사용하였을 때 퇴비화가 진행됨에 따라 다른 처리구들에 비해 EC 및 유기물 함량이 크게 감소되고 총질소 함량은 증가하는 경향을 보였으며 숯비타를 이용한 퇴비 부숙도 판정에서도 부숙 완료 판정이 나와 부숙이 촉진된 것으로 판단된다. 또한 혼합균주를 처리하였을 때 무기성분 함량이 크게 증가됨을 확인하였고 유해성분함량은 퇴비품질공정규격에 적합하였다. 따라서 피트모스:코코피트:BPP-BA를 6:2:2의 비로 혼합하고 미생물제로 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei* 및 *Sacchromyces cerevisiae*를 1:1:1의 비로 혼합하여 깔짚 부피 대비 3%를 첨가한 것을 최적의 혼합 깔짚으로 선정하였다 (Table 3-37~40).

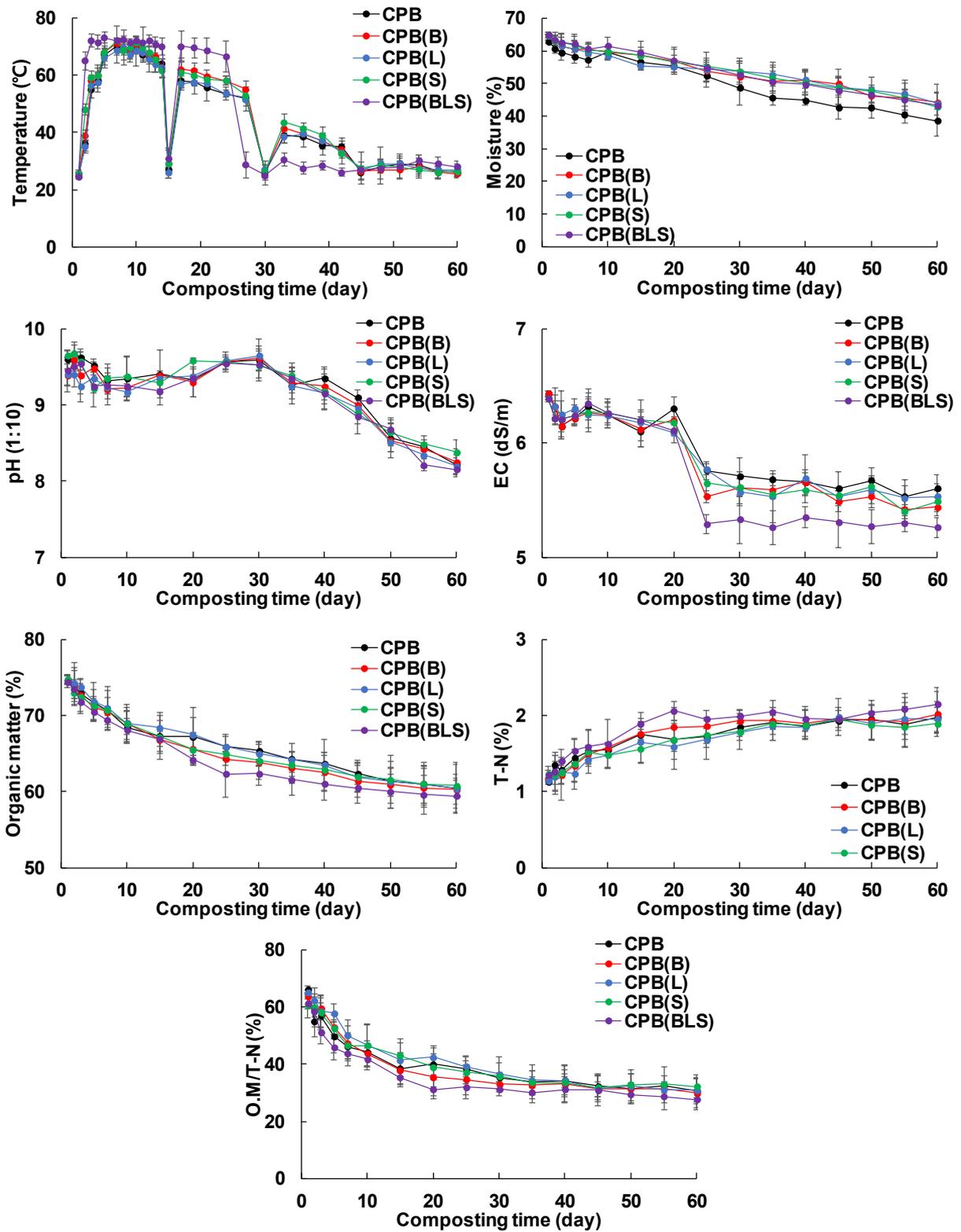


Fig. 3-24. 단독 및 혼합 미생물제 처리에 따른 퇴비화 특성 변화.

Table 3-37. 단독 및 혼합 미생물제 처리에 따른 퇴비 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 60 days after treatment	
CPB	6	
CPB(B)	6	
CPB(L)	6	
CPB(S)	6	
CPB(BLS)	7	

Table 3-38. 단독 및 혼합 미생물제 처리에 따른 퇴비의 염분 함량 변화

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
CPB	1.94	1.91
CPB(B)	1.86	1.87
CPB(L)	1.89	1.90
CPB(S)	1.88	1.89
CPB(BLS)	1.85	1.88

Table 3-39. 단독 및 혼합 미생물제 처리에 따른 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	----- (%) -----				
CPB	5.20	2.67	0.85	0.80	2.53
CPB(B)	5.49	2.11	0.69	0.84	2.26
CPB(L)	5.15	2.53	0.84	0.80	2.44
CPB(S)	5.25	2.42	0.78	0.77	2.25
CPB(BLS)	5.71	2.71	0.92	0.87	2.82

Table 3-40. 단독 및 혼합 미생물제 처리에 따른 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
CPB	24.5	ND	23.5	105.5	11.0	15.5	415.5	ND
CPB(B)	26.7	ND	19.0	95.0	8.5	17.5	318.5	ND
CPB(L)	38.0	ND	35.5	81.0	17.5	16.0	421.0	ND
CPB(S)	35.2	ND	31.0	83.5	17.5	16.5	360.5	ND
CPB(BLS)	30.9	ND	29.0	102.0	14.5	17.5	460.0	ND

최적비율로 혼합된 깔짚 소재의 악취저감 능력을 평가하기 위하여 퇴비화 과정중 발생하는 악취를 분석하였다 (Fig. 3-25 및 Fig. 3-26). 이 실험에서 기존 수분조절재로 많이 활용되어 지는 톱밥에 본 연구에서 개발된 혼합미생물제로 접종하여 대조구 (SD)로 활용하였다. 본 연구에서 개발된 바이오차 혼합깔짚 소재는 톱밥대비 가축분뇨의 퇴비화 과정에서 특히 많이 배출되는 Acetaldehyde, ammonia, butanal, butanoic acid, dimethyl sulfide 및 hydrogen sulfide를 현저하게 감소시켰다. 총 악취 발생량 저감 효율은 1일차, 7일차 및 30일차에 각각 45.5, 73.5 및 83.0%로 퇴비화 시기가 증가함에 따라 배출되는 총 악취량은 감소하였으며 악취의 저감 효율은 증가하는 경향이었다.

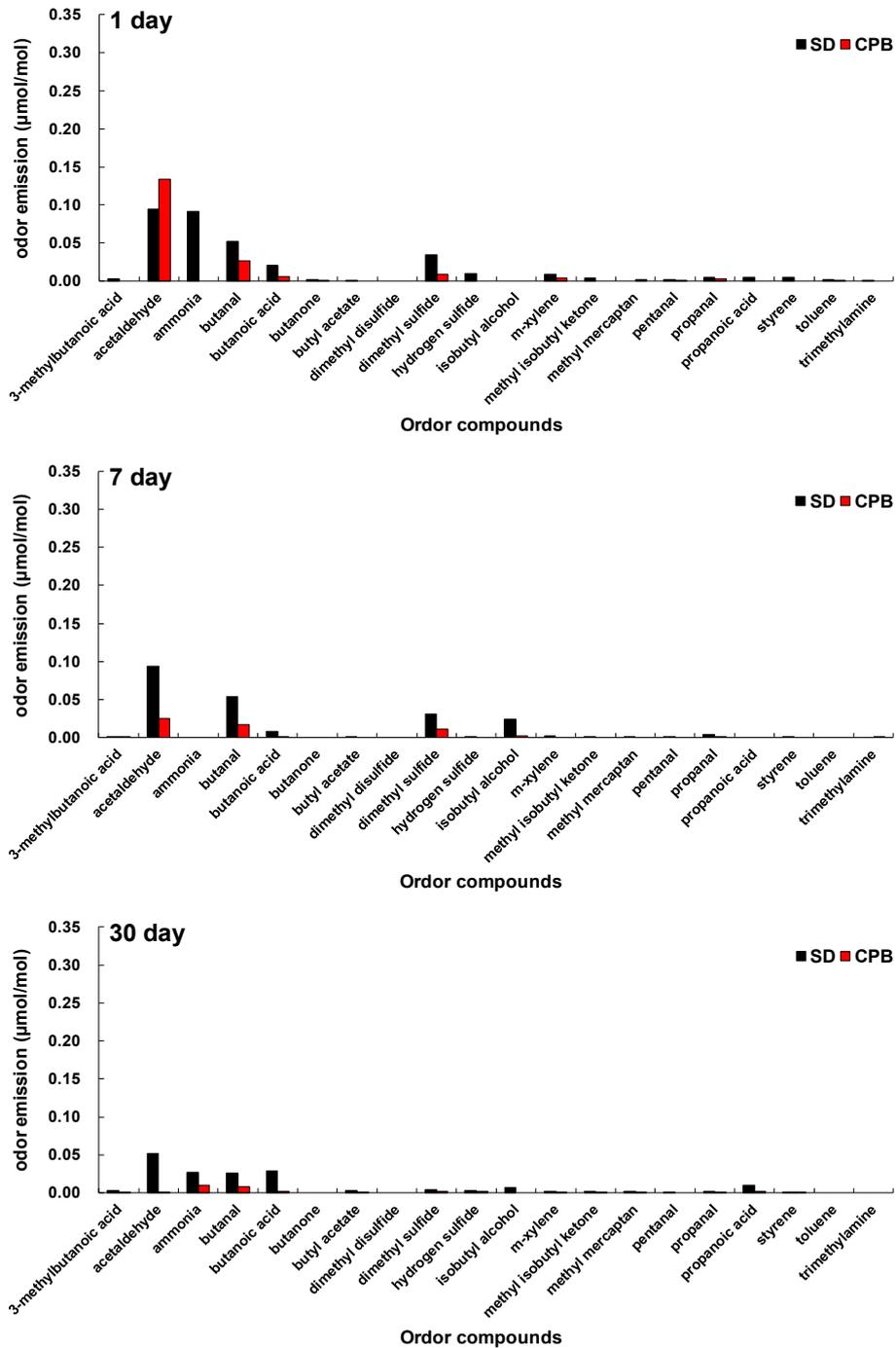


Fig. 3-25. 톱밥 및 바이오차 혼합깔짚 적용 우분뇨 퇴비화 과정에서 배출되는 악취 배출 특성.

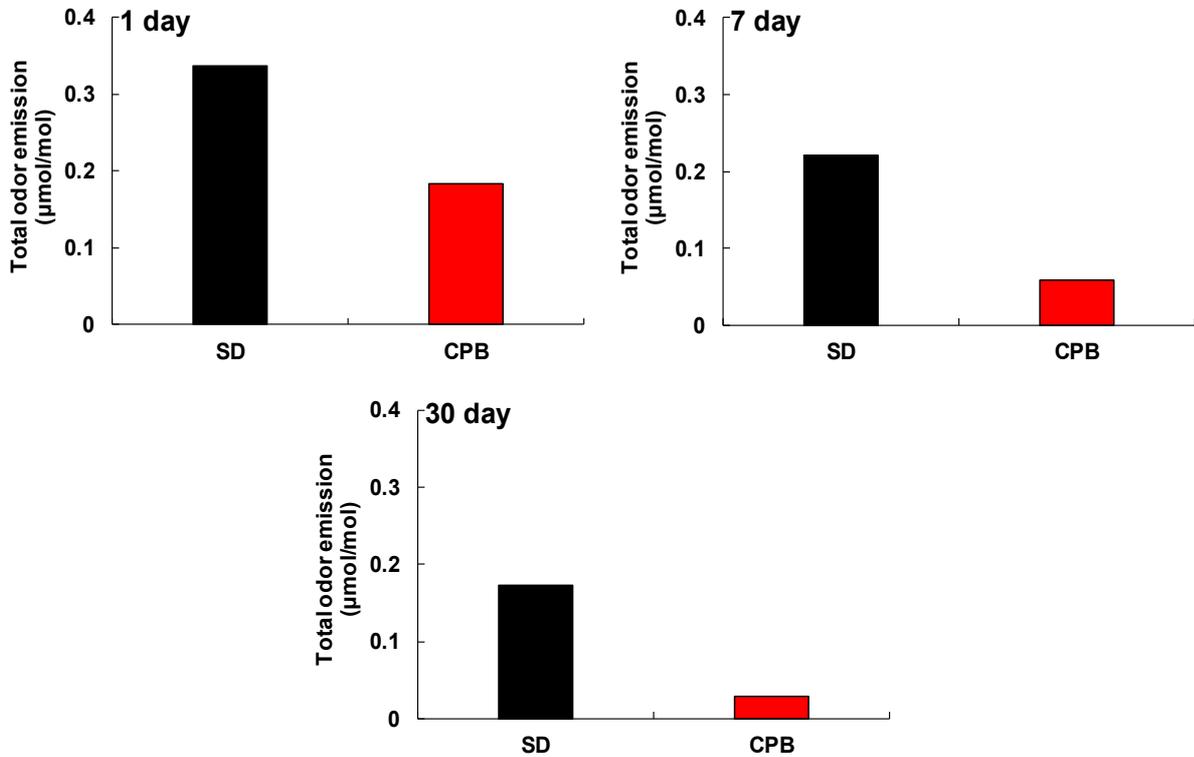


Fig. 3-26. 퇴비화 기간에 따른 톱밥 및 최적 혼합 깔짚의 악취 총 발생량 변화.

③ 최적비율로 혼합된 깔짚 소재의 이화학적 분석 및 안전성 평가

상기 ①항과 ②항의 최적 비율로 혼합된 깔짚 소재의 이화학적 특성은 Table 3-41~42에서 보는 것과 같다. 최적 혼합 깔짚 소재의 pH는 6.2로 약산성이었으며, 다량의 유기물과 일부 미량원소를 포함하고 있으며, 수분흡수용량이 669%로 매우 높은 수준이었다. 최적화된 바이오차 혼합깔짚 내에 유해성분은 미량 또는 검출한계 이하로 함유되어 있어, 이를 축사 및 가축분뇨 퇴비사에 적용하는데는 어려움이 없을 것으로 판단된다.

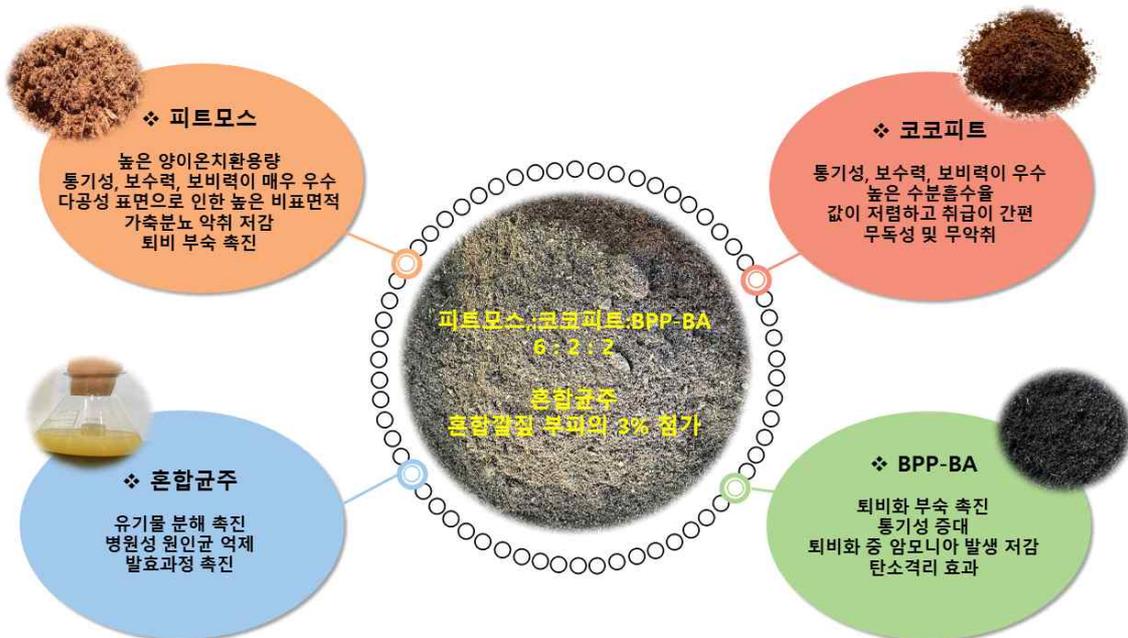


Fig. 3-27. 최적비율로 혼합된 깔짚 소재.

Table 3-41. 최적비율로 혼합된 깔짚 소재의 이화학적 특성

pH	EC	OM	T-N	P ₂ O ₅	K	Ca	WC	WHC	Bulk density	유효입경
	(dS/m)	---- (%)	----	-----	(mg/kg)	-----	30.4	668.7	(g/cm ³)	(mm)
6.2	2.06	81.7	0.08	119.7	4266.1	3221.8	30.4	668.7	0.18	0.06

Table 3-42. 최적비율로 혼합된 깔짚 소재의 유해성분 분석

Fe	Mn	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
----- (mg/kg) -----								
1570.4	351.9	ND	ND	9.54	2.34	3.94	0.54	29.8

(3) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 기술 확립

(가) 최적화된 깔짚 소재와 우분뇨 혼합비율 선정

최적화된 깔짚 소재와 우분뇨 혼합비율을 선정하기 위하여 가축분뇨 (CM) 중량 10을 기준으로 최적화된 깔짚소재 (CPB)를 2, 1 및 0.5의 비율로 혼합하여 구축된 퇴비화 장치에 주입하고, 퇴비화조 내에 송풍조건을 분당 1 L로 설정하여 퇴비화하였으며, 퇴비화 과정 동안의 특성과 최종 제조된 퇴비의 품질특성 평가를 실시하였다 (Fig. 3-28). 우분뇨와 바이오차 혼합 깔짚의 비율이 10:1일 때 8일차에 온도가 70°C까지 상승하는 반면에 그 외에 비율에서는 10일차에 온도가 급격히 상승하였다. 모든 처리구에서 퇴비화 시작 후 15일차에 뒤집기를 실시하여 온도가 감소하였다. 뒤집기 이후 온도가 다시 급격히 상승하였으며, 우분뇨와 바이오차 혼합 깔짚의 비율이 10:1일 때가 가장 높은 온도를 보였다. 퇴비화 시작 후 약 26일을 기점으로 온도가 감소하기 시작하였고, 이 시기가 퇴비의 숙성시기로 간주되어 진다. 퇴비화 과정 중 수분함량, pH 및 EC는 우분뇨와 바이오차 혼합 깔짚의 비율에 상관없이 비교적 유사한 패턴을 보였다.

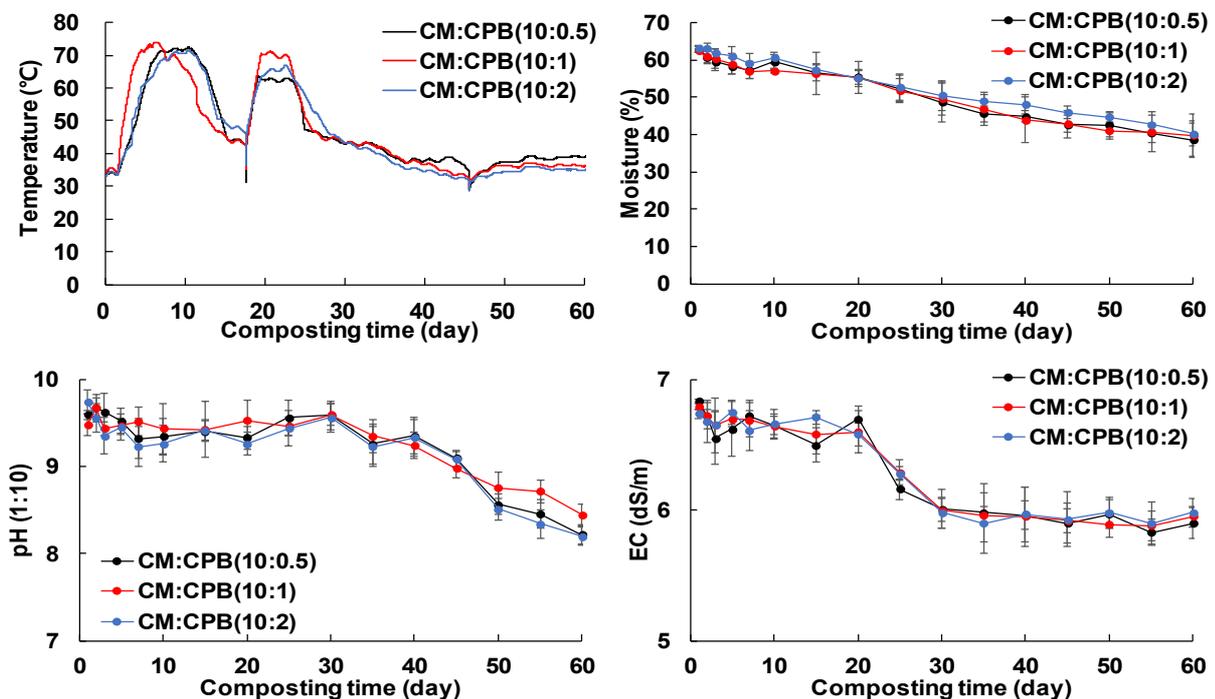


Fig. 3-28. 우분뇨 및 바이오차 혼합깔짚 비율별 퇴비화 과정 중 온도, 수분, pH 및 EC의 변화.

우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 비율에 따른 가축분뇨의 퇴비화 과정 중 유기물, 질소 및 유기물/질소비에 관한 결과는 Fig. 3-29에서 보는 것과 같다. 유기물 함량의 경우 우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 비율이 10:1일 때 다른 처리비율보다 급격히 분해되는 양상을 보였다. 이는 앞서 언급된 퇴비더미의 온도에서와 같이 다량의 유기물이 급격히 분해됨에 따라 온도가 상승되고, 유기물 함량이 감소된 것으로 판단된다. 질소의 함량은 우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 비율이 10:0.5 및 10:1에서는 비교적 유사한 결과를 보였으나 우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 비율이 10:2일 때는 비교적 낮은 질소함량을 보였다. 이는 바이오차 혼합깔짚의 비율이 비교적 낮아 퇴비화 효율이 낮았기 때문으로 판단된다. 이상의 결과를 미루어볼 때, 고품질 퇴비를 생산하기 위한 우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 최적 비율이 10:1인 것으로 판단된다.

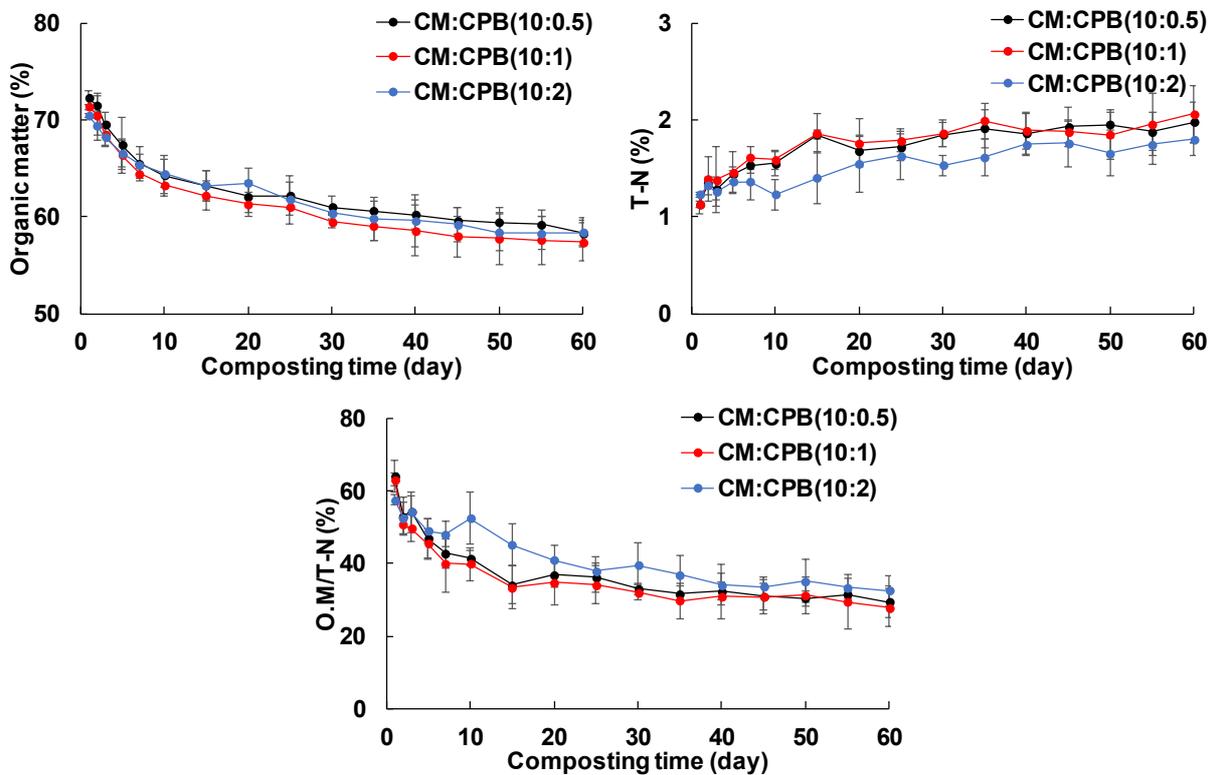


Fig. 3-29. 우분뇨 및 바이오차 혼합깔짚 비율별 퇴비화 과정 중 유기물, 질소 및 유기물/질소 비 변화.

우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 비율에 따른 가축분뇨의 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 암모니아 가스 배출특성은 Fig. 3-30~32에서 보는 것과 같다. CO₂의 경우 퇴비더미의 온도와 유사한 패턴으로 반응 8일차까지 급격히 증가하여 최고점에 도달되었으며, 8일차 이후에 CO₂ 농도는 점진적으로 감소되었다. 특히, 퇴비화 시작 후 15일 및 30일 경에 뒤집기를 실시하였으나 CO₂ 배출량에는 큰 영향을 미치지 못하였다. CH₄의 발생은 퇴비화 시작과 동시에 일시적으로 증가하는 경향이었으나 그 이후에는 주기적으로 공기가 송풍관을 통하여 주입되고, 개발된 깔짚소재의 공극특성으로 인하여 조 내부가 호기성 상태가 됨에 따라 CH₄ 발생량은 현저하게 감소된 것으로 판단된다. N₂O의 발생량도 동일하게 반응초기 급격히 증가하는 경향이었으나 8일 차 이후에는 급격히 감소하여 10일차부터는 거의 발생되지 않았다. NH₃ 발생량의 경우 퇴비화 초기 일시적으로 배출되는 경향이었으나 10일차부터는 거의 발생되지 않았다. 특히 우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 혼합비율에 따른 각 가스의 배출량은 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 퇴비화 시설에서 온실가스 및 암모니아 가스의 저감은 청정 축사환경에

조성하는데 중요한 요소 중의 하나이다. 본 깔짚 소재를 이용하여 온실가스 및 암모니아 가스를 저감하기 위해서는 비교적 퇴비화 초기에 이들 가스를 저감시킬 수 있는 전략이 마련되어야 할 것으로 판단된다. 우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 비율에 따른 가축분뇨의 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 암모니아 가스 배출량을 누적으로 나타낸 결과는 Fig. 3-31에서 보는 바와 같다. 우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 비율과 관계없이 CO₂, CH₄, N₂O 및 NH₃ 배출량은 각각 15일차, 13일차, 8일차 및 8일차에 평형에 도달되었으며, 속도 반응식으로 구분해 본다면 초기의 급격히 배출되는 구간과 후기의 미량으로 배출되는 2구간으로 나눌 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 결과는 반응초기의 미생물에 의한 유기물의 분해과정과 퇴비화 조내 환경변화로 인하여 도출된 결과로 판단된다.



Fig. 3-30. 온실가스 및 암모니아 가스 포집 전경.

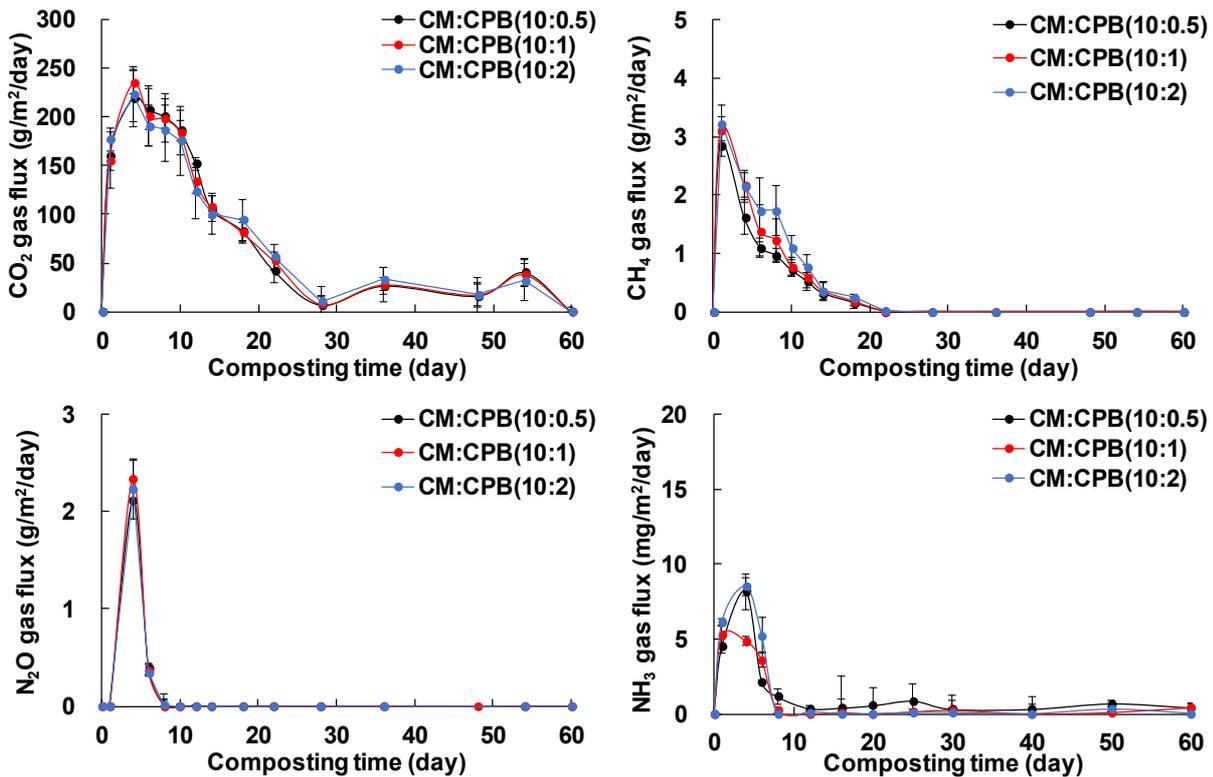


Fig. 3-31. 우분뇨 및 깔짚 혼합비율에 따른 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 암모니아 가스 배출량 변화.

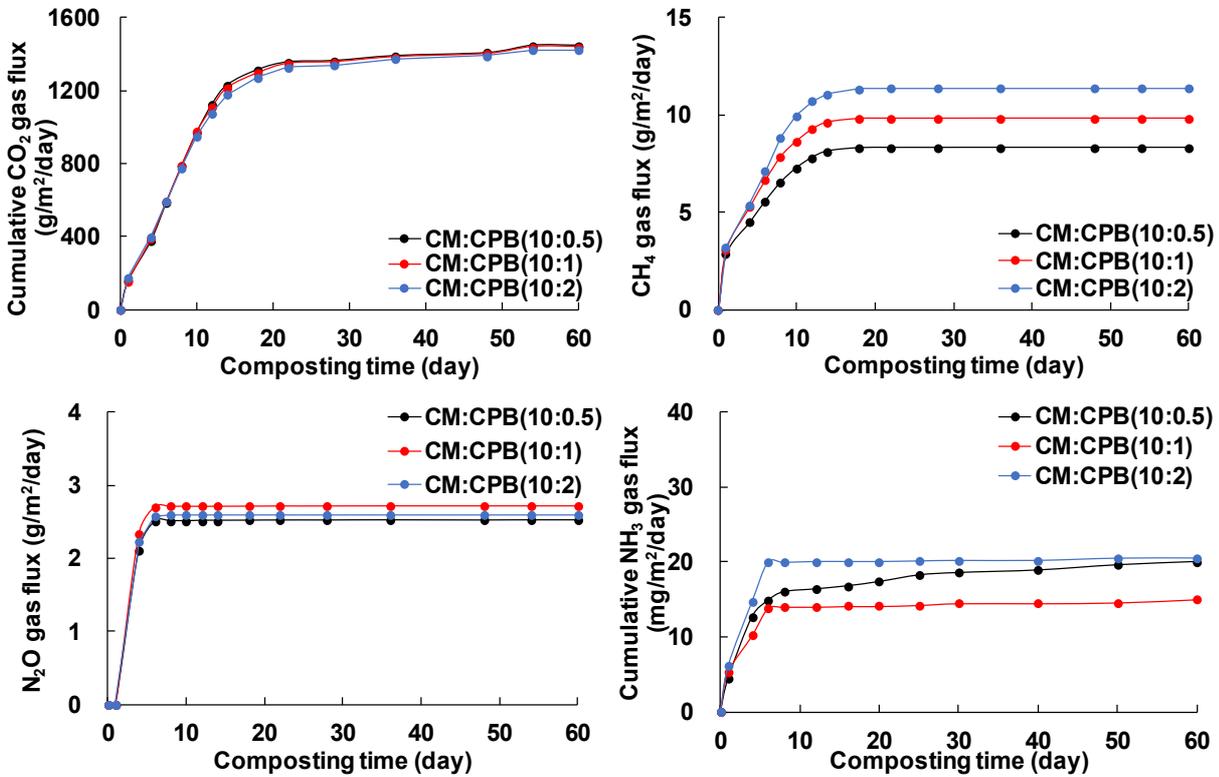


Fig. 3-32. 우분뇨 및 깔짚 혼합비율에 따른 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 암모니아 가스의 누적 배출량.

우분뇨 및 깔짚 혼합비율에 따른 퇴비의 품질특성 평가를 위하여 퇴비화 시작 후 30일 및 60일에 시료를 채취하여 솔비타법을 이용하여 부숙도 평가를 실시하였다 (Table 3-43). 우분뇨 및 깔짚 혼합비율에 따라 약간 차이가 있었으나 30일부터 비교적 부숙후기 단계이었으며, 퇴비화 기간이 연장됨에 따라 부숙상태는 점점 양호해지는 경향이였다. 특히, 우분뇨와 깔짚 혼합비율이 10:1일 때 퇴비화 시작 후 60일에 부숙완료 판정을 받았다. 현재 솔비타법을 이용한 부숙도 판정 결과 부숙후기만 되어도 퇴비를 농경지에 시용할 수 있게 판매 또한 가능하다. 하지만 가축퇴비의 규격 또한 점점 강화되고 있어 부숙후기에 만족할게 아니라 부숙완료 판정을 받을 수 있는 체계적인 방안이 필요하다고 판단된다.

Table 3-43. 솔비타법을 이용한 우분뇨 및 바이오차 혼합깔짚 혼합비율별 제조된 퇴비의 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
CM:CPB(10:0.5)	4	6
CM:CPB(10:1)	5	7
CM:CPB(20:1)	4	6

가축퇴비의 경우 비록 솔비타법을 이용하여 부숙후기 및 부숙완료 판정을 받았다 할지라도 약간의 냄새가 나게나면 종자발아시험을 통하여 부숙도 판정시험을 하게 된다. 본 연구에서는 생산된 퇴비에서 어떠한 악취도 나지 않았지만 본 연구에서 개발된 깔짚소재가 적용된 퇴비의

안정성과 신뢰성을 확보하기 위하여 종자발아법 시험 또한 수행되어졌다. 그 결과 Fig. 3-33 및 Table 3-44에서 보는 것과 같이 바이오차 혼합깔짚이 적용된 퇴비의 발아지수는 모두 70 (비료품질검사 기준) 이상으로 부숙도 평가지수를 만족하였다.

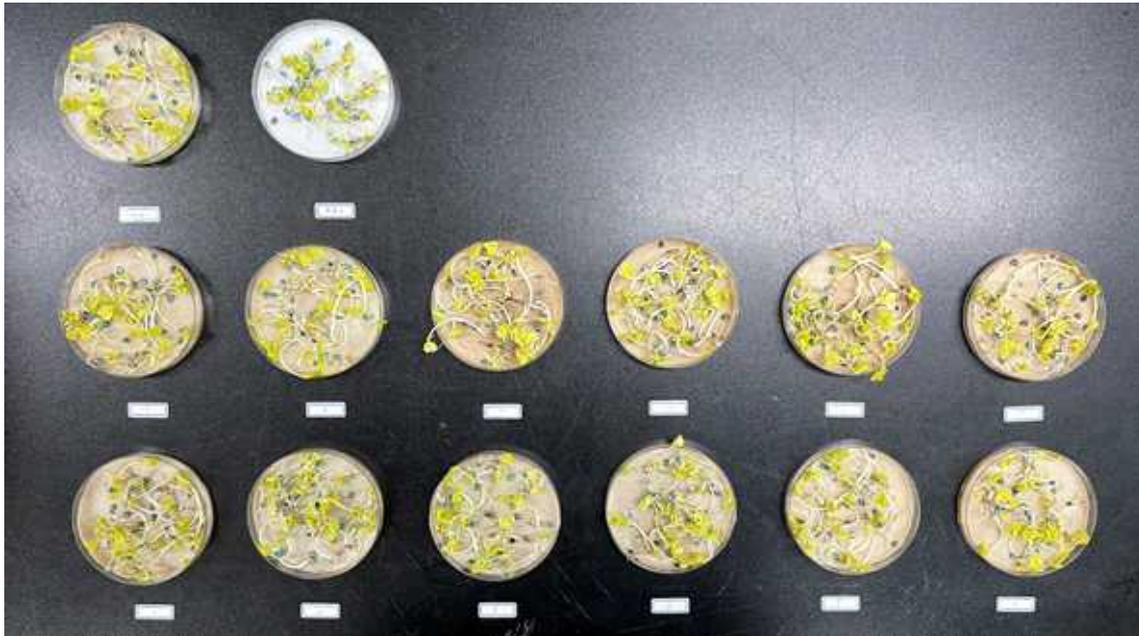


Fig. 3-33. 우분뇨 및 바이오차 혼합깔짚 혼합비율별 제조된 퇴비의 종자발아시험.

Table 3-44. 종자발아법을 이용한 우분뇨 및 바이오차 혼합깔짚 혼합비율별 제조된 퇴비의 부숙도 판정

처리구	처리일(day)	발아율(GR)	뿌리길이(RE)	발아지수(GI)
CM		51.9	85.2	44.2
CM:CPB(10:0.5)	0	53.9	82.5	44.5
	30	87.6	106.9	93.7
	60	100.4	113.0	113.4
CM:CPB(10:1)	0	50.6	90.1	45.5
	30	97.7	113.0	110.4
	60	101.1	134.0	135.5
CM:CPB(20:1)	0	52.2	84.3	44.1
	30	87.6	106.9	93.7
	60	99.4	115.1	114.4

우분뇨 및 바이오차 혼합깔짚 혼합비율별 제조된 퇴비의 품질특성을 조사한 결과 퇴비공정 규격 품질검사기준을 모두 만족하는 결과를 보였으며, 특히 우분뇨와 바이오차 혼합깔짚의 비율이 10:1일 때 보다 안정적인 품질특성을 보였다 (Table 3-45~47). 또한 제조된 퇴비 모두 유해성분은 품질검사기준을 만족하였으며, 대장균 및 살모넬라균은 검출되지 않았다 (Fig. 3-34~39).

Table 3-45. 우분뇨 및 혼합 깔짚 혼합비율별 제조된 퇴비의 염분함량

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
CM:CPB(10:0.5)	1.89	1.76
CM:CPB(10:1)	1.75	1.86
CM:CPB(20:1)	1.88	1.93

Table 3-46. 우분뇨 및 혼합 깔짚 혼합비율별 제조된 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	----- (%) -----				
CM:CPB(10:0.5)	5.21	2.49	0.85	0.80	2.53
CM:CPB(10:1)	5.71	2.71	0.92	0.87	2.82
CM:CPB(20:1)	4.78	2.55	0.82	0.73	2.27

Table 3-47. 우분뇨 및 혼합 깔짚 혼합비율별 제조된 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
CM:CPB(10:0.5)	31.5	ND	27.0	95.5	14.0	19.0	485.5	ND
CM:CPB(10:1)	28.3	ND	29.0	102.0	14.5	17.5	460.0	ND
CM:CPB(20:1)	38.0	ND	35.5	81.0	17.5	16.0	421.0	ND

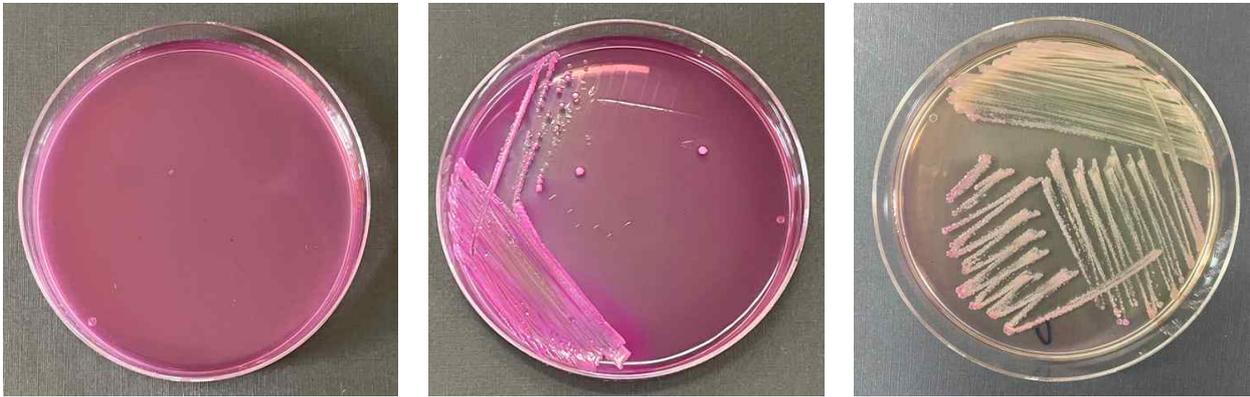


배양 전



배양 후

Fig. 3-34. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 대장균 증균배양 (mEC Broth).



배양 전

배양 후 (미검출 시)

배양 후 (검출 시)

Fig. 3-35. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 대장균 분리배양(MacConkey sorbitol Agar).

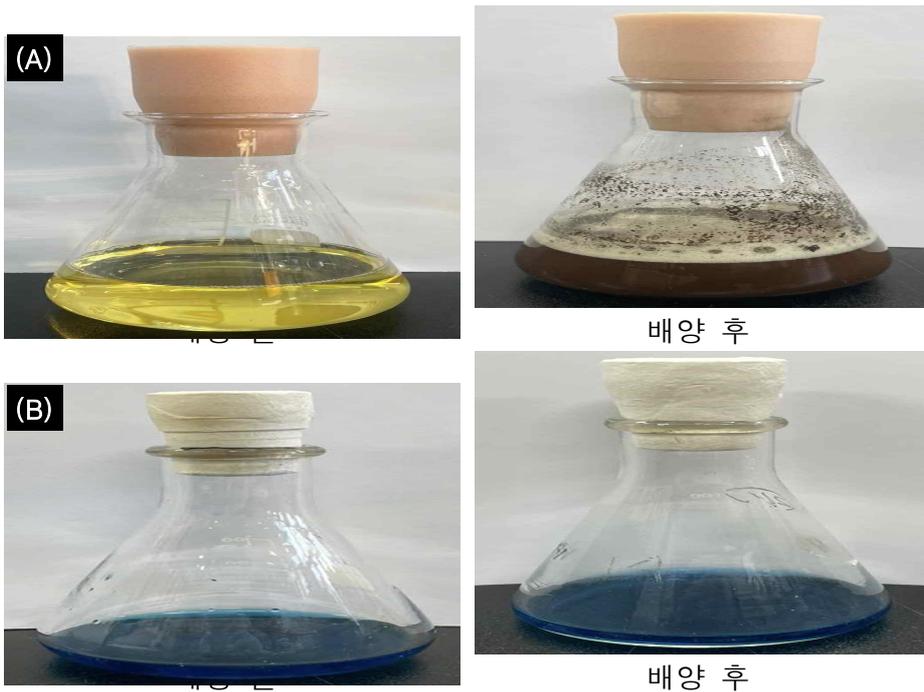


배양 전

배양 후 (미검출 시)

배양 후 (검출 시)

Fig. 3-36. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 대장균 확인시험 (Eosine Methylene Blue Agar).



(A)

배양 후

(B)

배양 후

Fig. 3-37. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 살모넬라 증균배양 (Pepton water(A), Rappaport-Vassiliadis broth(B)).



배양 전

배양 후 (미검출 시)

배양 후 (검출 시)

Fig. 3-38. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 살모넬라 분리배양 (Desoxycholate Citrate Agar).



배양 후 (미검출 시)

배양 후 (검출 시)

Fig. 3-39. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 살모넬라 확인시험 (Triple Sugar Iron Agar(TSI 사면배지)).

(나) 최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 송풍조건 확립

최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 송풍조건을 확립하기 위하여 상기 (가) 항의 최적조건인 가축분뇨와 깔짚의 비율을 10:1로 고정하고, 송풍조건을 0.5, 1 및 2 L/min으로 설정하여 퇴비화 과정 동안 특성을 평가하고, 최종 제조된 퇴비의 품질특성 평가를 실시하였다. 송풍조건에 따라 퇴비화 과정동안 퇴비더미의 온도변화는 Fig. 3-39에서 보는 것과 같이 모든 송풍조건에서 반응 10일차에 가장 높은 온도에 도달되었고 비교적 유사한 패턴을 보인 반면에 송풍조건이 1 L/min으로 조절하였을 때 다른 송풍조건에 비해 온도가 더 높은 것을 확인하였다. 이는 1 L/min의 송풍조건이 본 실험에 사용된 퇴비화조 내 미생물 활성을 촉진시키는데 가장 효율적인 조건이었던 것으로 판단된다 (Fig. 3-40). 송풍조건에 따른 퇴비더미의 수분, pH 및 EC는 유의적인 차이 없이 유사한 패턴을 보였다.

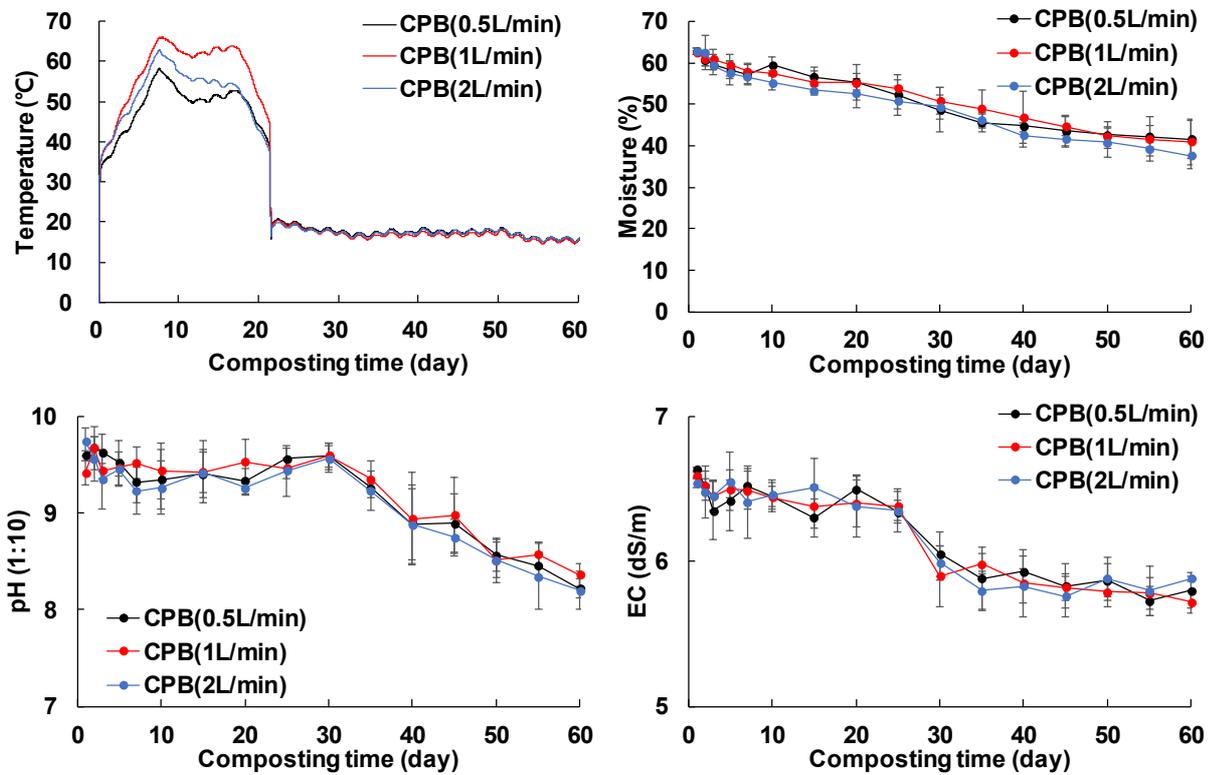


Fig. 3-40. 송풍조건에 따른 퇴비화 과정 동안 퇴비더미의 온도, 수분, pH 및 EC의 변화.

송풍조건에 따른 퇴비화 과정동안 퇴비더미의 유기물, 질소 및 유기물/질소비를 나타낸 결과는 Fig. 3-41과 같다. 송풍조건에 따라 유기물, 질소 및 유기물/질소비는 큰 차이 없이 유사한 경향이였다. 하지만 가스배출 특성은 송풍조건에 따른 유의적인 차이를 보였다. 특히 송풍량이 증가함에 따라 온실가스 및 암모니아 가스량은 급격히 증가하는 경향이었는데, 이는 퇴비화조 내부로 유입된 공기가 온실가스 및 암모니아 가스를 밀어냄으로써 증가한 것으로 판단된다. 주입된 공기의 산소가 미생물의 활성에 이용이 되었다면 송풍조건이 높은 2 L/min에서 유기물의 함량이 더 감소되고, 퇴비더미의 온도는 더 증가되어야 하는데, 본 연구 결과는 그러지 않다는 점을 고려할 때, 과량의 공기유입은 이동상 가스로 적용되어 온실가스 및 암모니아 배출량 증가를 조장한 것으로 판단된다. 이와 같은 이유에서 퇴비화조의 송풍량은 축사 규모 및 퇴비의 양을 고려하여 산정할 필요가 있을 것으로 판단된다. 송풍량에 따른 온실가스 및 암모니아 가스의 배출량 증가에 관한 결과는 배출된 가스의 누적 그래프로 더 명확하게 관찰할 수 있었다 (Fig. 3-42~43).

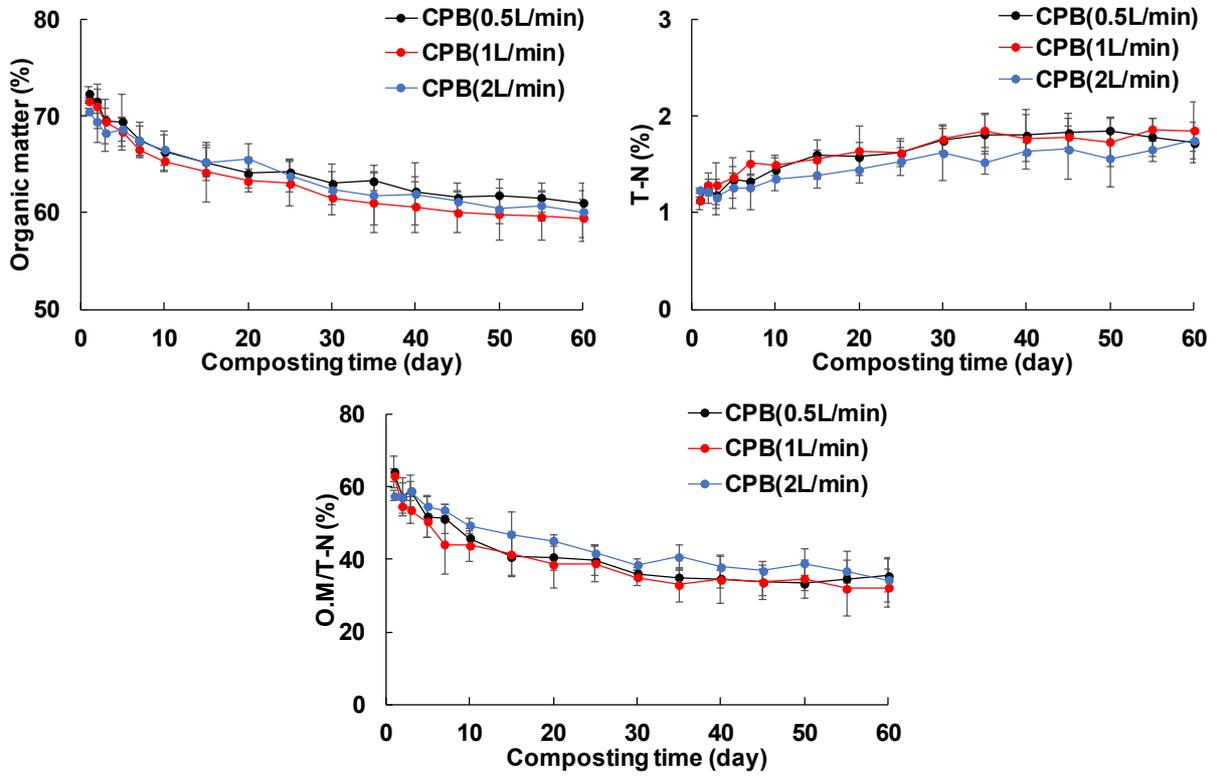


Fig. 3-41. 송풍조건에 따른 퇴비화 과정 동안 퇴비더미의 유기물, 질소, 유기물/질소비의 변화.

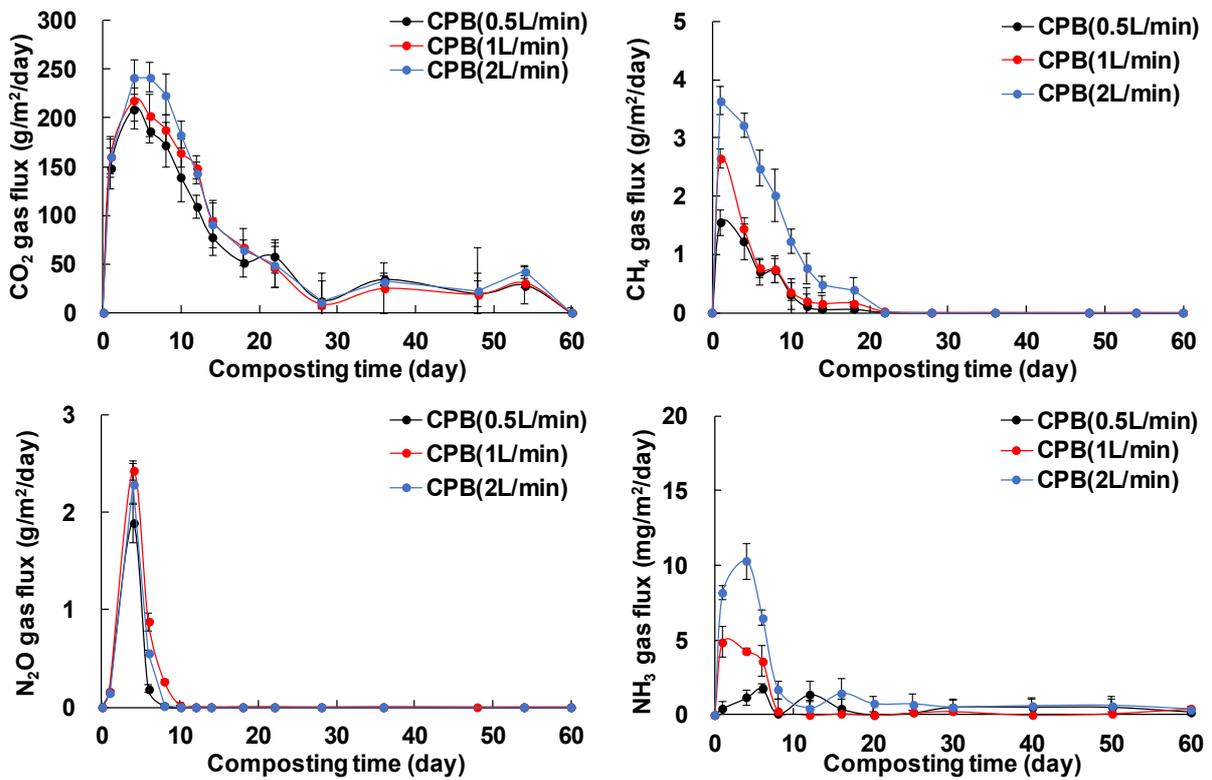


Fig. 3-42. 송풍조건에 따른 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 암모니아 가스 발생 특성.

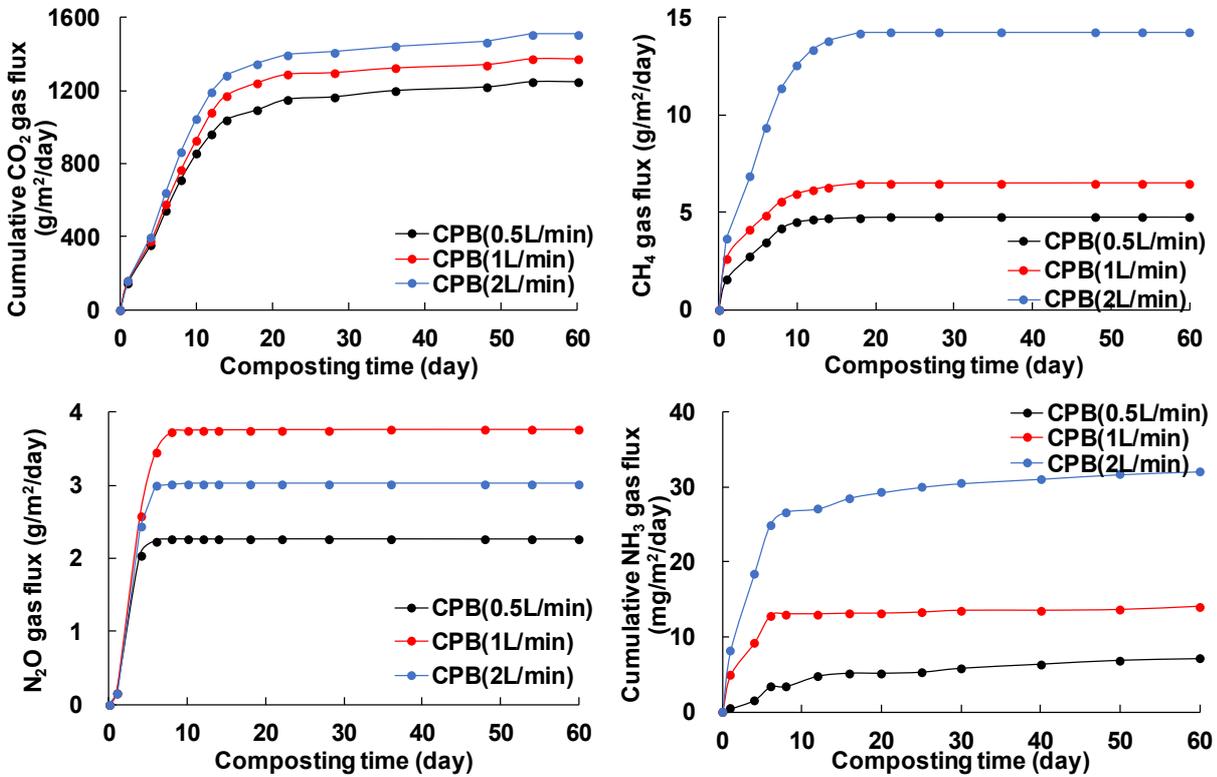


Fig. 3-43. 송풍조건에 따른 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 암모니아 가스 누적 발생량.

송풍조건에 따라 제조된 퇴비의 품질특성을 평가한 결과 퇴비공정규격 품질검사기준을 모두 만족하는 결과를 보였으며, 특히 송풍조건이 1 L/min으로 설정하였을 때, 품질과 발아지수가 높았다 (Table 3-48~52).

Table 3-48. 송풍조건에 따른 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 부숙도 판정

Treatment	Compost maturity index (solvita)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
CPB(0.5L/min)	4	6
CPB(1L/min)	5	7
CPB(2L/min)	4	6

Table 3-49. 종자발아법을 이용한 송풍조건에 따라 제조된 퇴비의 부숙도 판정

처리구	처리일(day)	발아율(GR)	뿌리길이(RE)	발아지수(GI)
CM		55.3	78.3	43.3
CPB(0.5L/min)	0	52.2	79.8	41.7
	30	85.9	105.2	90.4
	60	93.7	108.0	101.1
CPB(1L/min)	0	55.3	81.0	44.8
	30	96.7	114.7	110.9
	60	98.1	139.4	136.8
CPB(2L/min)	0	53.3	85.0	45.3
	30	87.6	110.4	96.7
	60	99.4	116.5	115.8

Table 3-50. 송풍조건에 따라 제조된 우분뇨 및 깔짚 소재 퇴비의 염분함량

Treatment	염분 (%)	
	At 30 days after treatment	At 60 days after treatment
CPB(0.5L/min)	1.89	1.76
CPB(1L/min)	1.78	1.84
CPB(2L/min)	1.88	1.90

Table 3-51. 송풍조건에 따라 제조된 우분뇨 및 깔짚 소재 퇴비의 무기성분 함량

Treatment	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	----- (%) -----				
CPB(0.5L/min)	5.21	2.44	0.86	0.79	2.56
CPB(1L/min)	5.54	2.73	0.89	0.85	2.76
CPB(2L/min)	5.12	2.54	0.84	0.75	2.31

Table 3-52. 송풍조건에 따라 제조된 우분뇨 및 깔짚 소재 퇴비의 유해성분 함량

Treatment	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
CPB(0.5L/min)	31.8	ND	26.0	98.0	10.5	18.5	399.0	ND
CPB(1L/min)	26.5	ND	28.5	104.5	12.0	19.0	475.0	ND
CPB(2L/min)	35.7	ND	32.5	89.5	15.0	14.5	415.5	ND

(다) 최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 최적 온도 선정

최적화된 깔짚 소재와 가축분뇨 적용 퇴비생산을 위한 최적 온도 선정을 위한 실험은 상기 (3)항과 (4)항에서 선정된 최적 혼합비율과 송풍조건을 퇴비화 장치에 설정하고, 여름, 가을 및 겨울철 퇴비화 시설 내에 온도를 기준으로 퇴비화 과정과 퇴비 품질을 평가하였다. Fig. 3-44는 여름, 가을 및 겨울철 퇴비화 시설 주변 온도를 나타내었으며, 여름, 가을 겨울의 평균기온은 각각 27.6, 20.2 및 8.9으로 겨울철 주변 온도가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 3-44). 특히 주변 온도가 감소함에 따라 미생물의 활동이 저조하여 퇴비더미의 온도 또한 감소되었으며, 특히 겨울철에는 퇴비더미의 최고 온도가 60℃ 정도 밖에 되지 않았다 (Fig. 3-45~46). 또한 겨울철에는 뒤집기를 한 후 온도가 다시 증가하지 않아 2차 온도상승 구간이 존재하지 않고, 바로 숙성단계가 되었다.

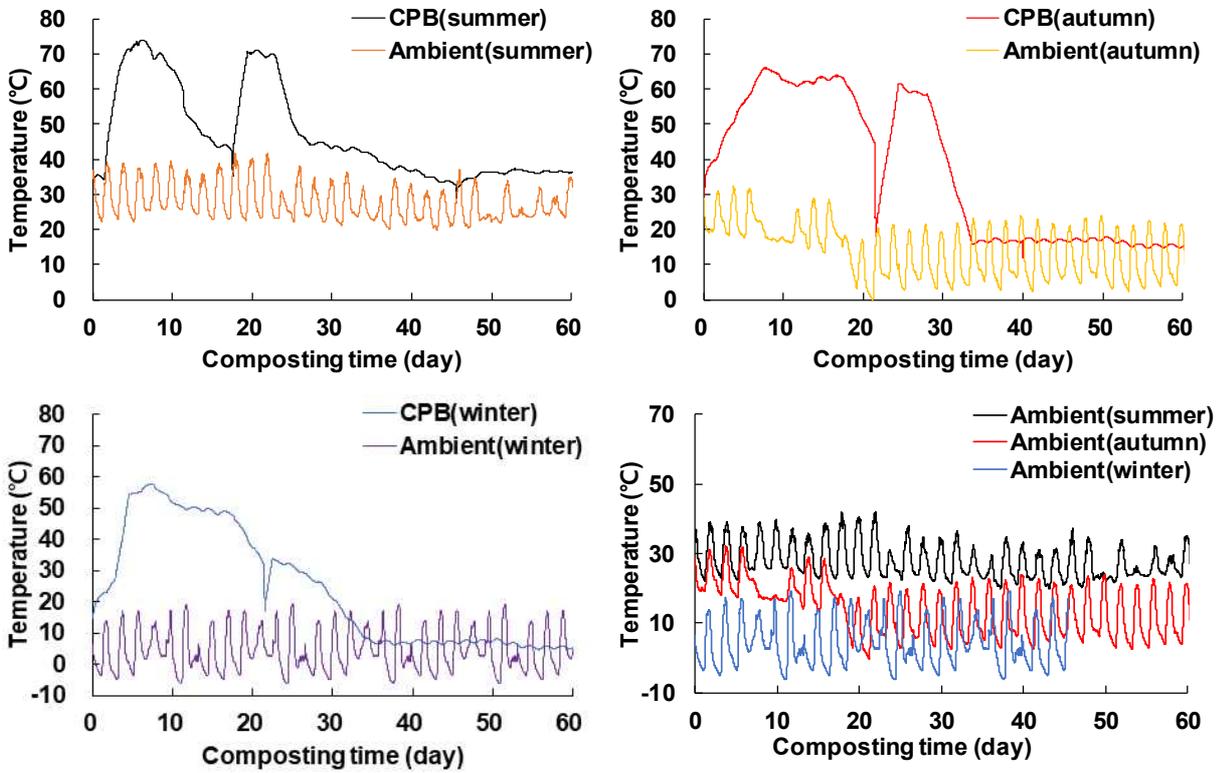


Fig. 3-44. 계절에 따른 퇴비화 시설 주변 온도.

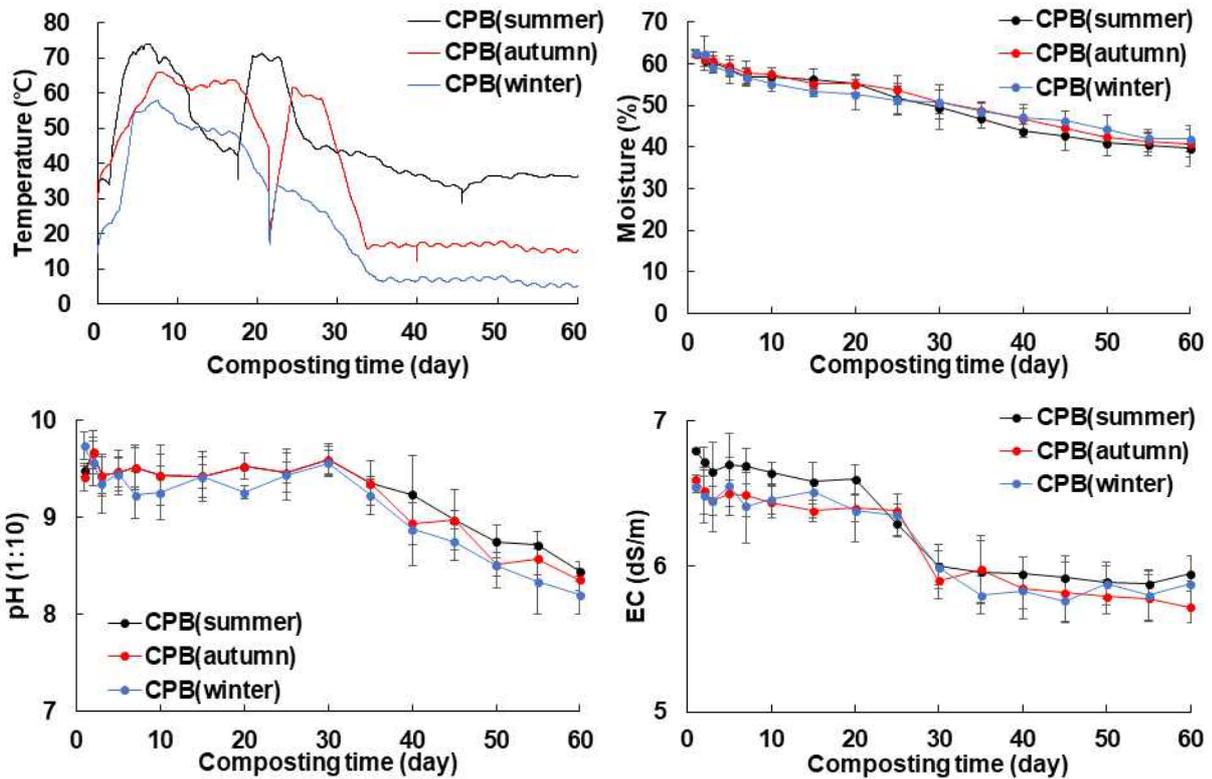


Fig. 3-45. 계절별 퇴비화 시설 주변 온도에 따른 퇴비화 과정 중 퇴비더미의 온도, 수분, pH 및 EC의 변화.

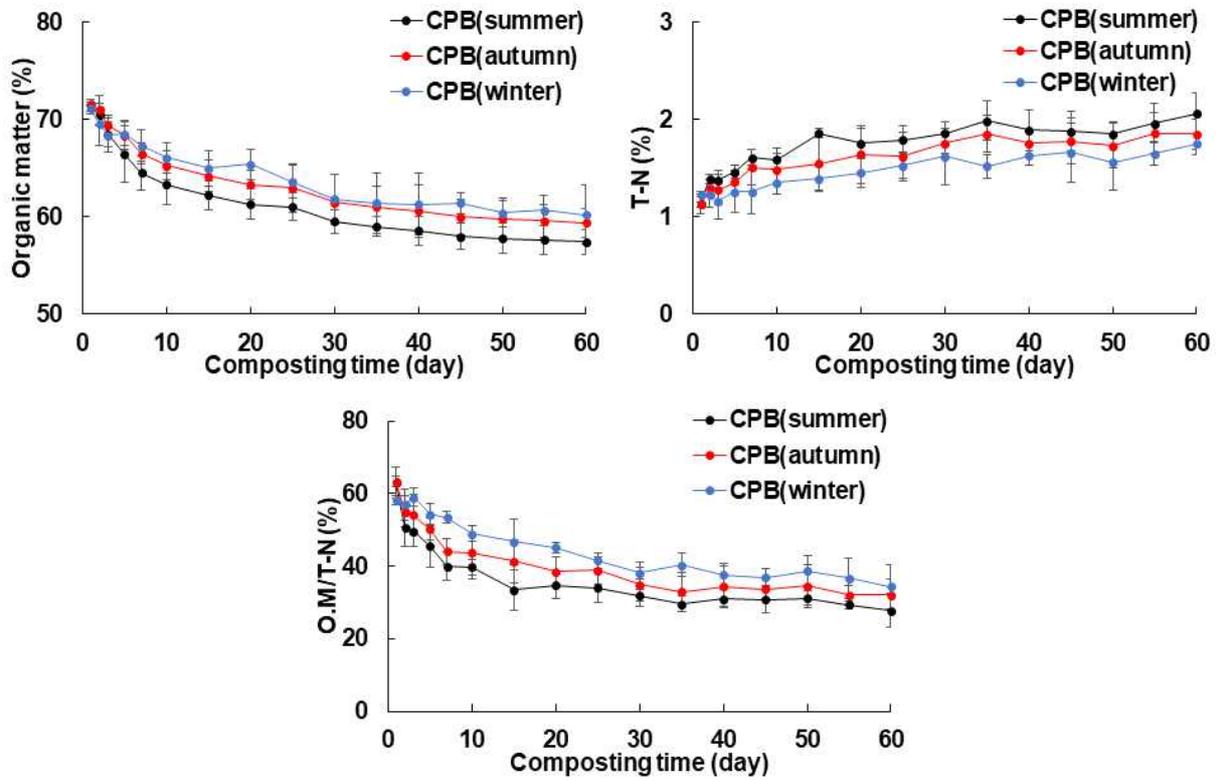


Fig. 3-46. 계절별 퇴비화 시설 주변 온도에 따른 퇴비화 과정 중 유기물, 질소 및 유기물/질소비 변화.

(라) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립

앞선 조건 실험들을 통해 선정된 최적화된 깔짚 소재에 한우의 일일 우분뇨 배설량 기준에 따라 우분뇨를 투입하고 수분 측정 센서를 이용해 수분을 측정하여 실험을 수행하였다. 우분뇨 투입 후 10분의 정치 시간을 두어 우분뇨 내 수분이 충분히 균질화되었을 때 수분을 측정하였다. 수분 측정 후 즉시 우분뇨를 다시 투입하며 위 과정을 반복하였다. 초기에는 10일 간격으로 우분 투입량을 설정하여 투입하였으며 30일 이후에는 5일 간격으로 우분뇨를 투입하였다.

수분 포화 기준은 수분함량 80%로 하였으며, 우분뇨 투입 60일 만에 수분함량이 82.9%에 도달하여 포화되었다 (Fig. 3-47). 이는 기존에 사용하던 톱밥의 한우농가 깔짚 교체 주기인 30~40일의 1.5~2배 높은 수치로 높은 수분흡수율을 보유한 코코피트 및 피트모스의 수분 흡수 능력에 의한 것으로 판단된다. 이러한 결과로 인해 기존 깔짚의 사용 일수를 최대 2배 연장하여 사용할 수 있을 것으로 보인다. 또한 실험과정에서 수분 측정 후 우분뇨를 즉시 재투입하여 일일 수분 증발량이 고려되지 않은 부분에 있어 허용한계치가 과소평가 되었을 것으로 보이며, 증발량을 고려하면 깔짚 사용 가능 일수는 더욱 연장될 것으로 판단된다.

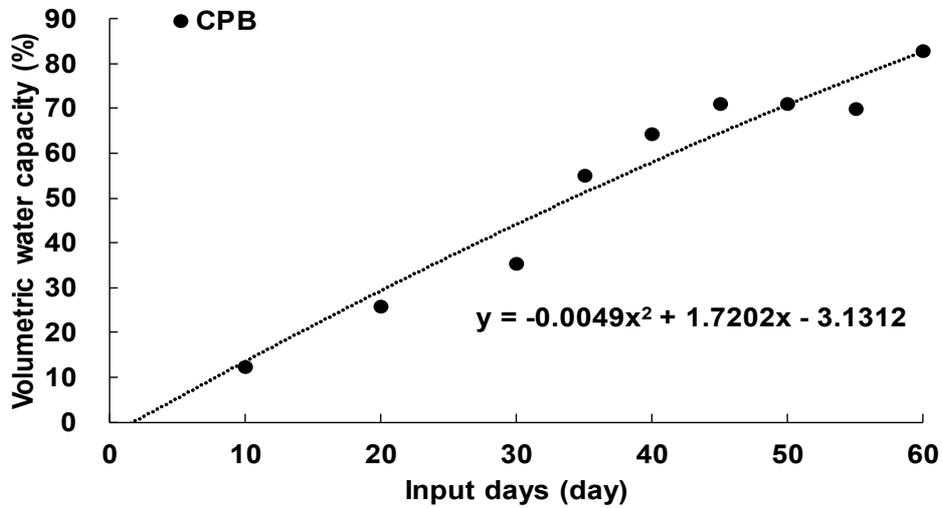


Fig. 3-47. 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치.

나) 축사바닥 깔짚 소재 적용 부숙미생물 배양 및 적용기술 개발

(1) 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물 배양조건 확립

(가) 미생물 종류별 질소원에 의한 효과

본 연구는 산업적으로 적용이 가능한 최적배지 조성을 확립하기 위해 미생물의 생육에 필요한 최적의 질소원을 선정하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일 미생물을 사용하였으며, 질소원은 Peptone, Yeast extract, Urea, NH₄Cl 등 4가지 질소원을 사용하였다. 질소원을 다르게 하면서 배양한 결과는 Fig. 3-48~49과 같다. 질소원으로 Yeast extract를 첨가한 배지에서 가장 높은 생육이 나타났으며, 그 다음으로 Peptone, NH₄Cl, Urea를 첨가한 배지 순으로 생육이 높았다. 무기 질소원(NH₄Cl, Urea)을 사용한 배지에서는 균체의 성장이 낮거나 거의 나타나지 않았고, 유기 질소원(Peptone, Yeast extract)의 경우 균체의 성장이 높게 나왔다. 이상의 결과는 무기질소원보다 유기질소원이 생육에 더 효과적이고, 균체량 증가를 위해 사용되는 유기 질소원은 60~70%의 단백질이 함유되어 있어 미생물 생장에 필요한 영양분이 풍부하기 때문이다.

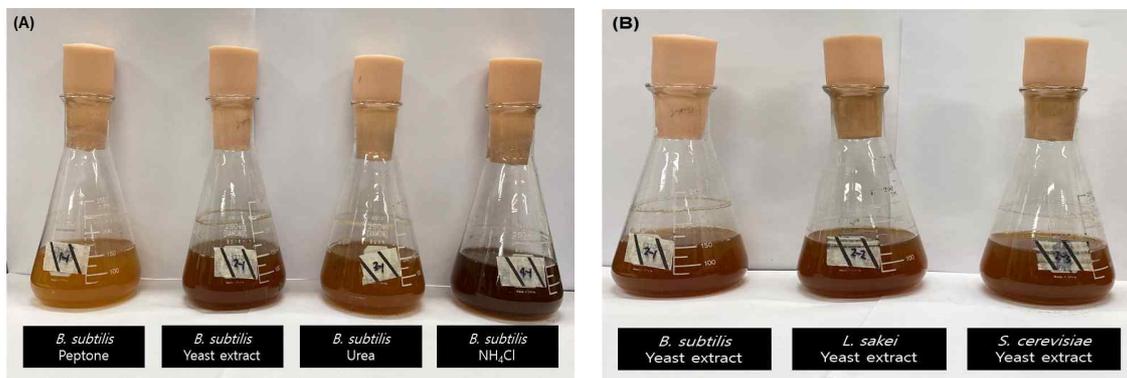


Fig. 3-48. 질소원 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);질소원 종류별, (B);미생물 종류별].

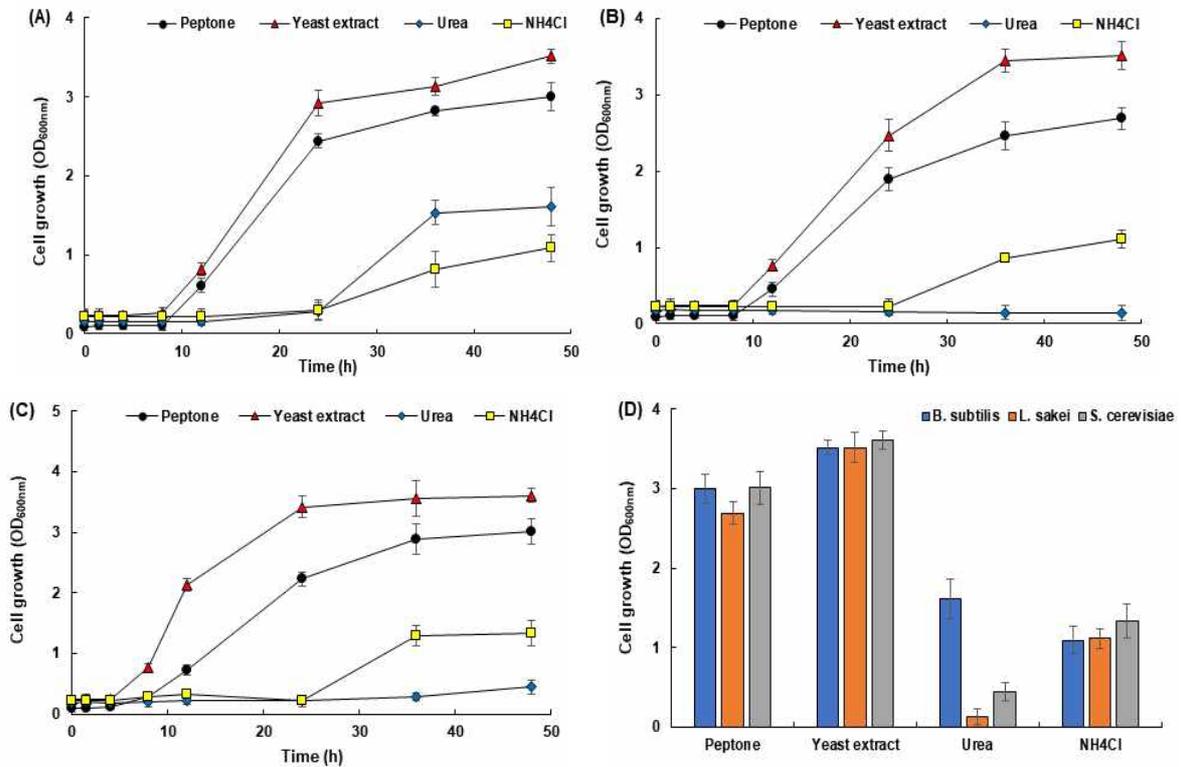


Fig. 3-49. 질소원 및 미생물 종류별 미생물의 생육 특성 [(A);질소원 종류별 *B. subtilis*의 생육, (B);질소원 종류별 *L. sakei*의 생육, (C);질소원 종류별 *S. cerevisiae*의 생육, (D);질소원 종류별 미생물 3종의 생육].

(나) 미생물 종류별 탄소원에 의한 효과

본 연구는 산업적으로 적용이 가능한 최적배지 조성을 확립하기 위해 미생물의 생육에 필요한 최적의 탄소원을 선정하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물을 사용하였으며, 탄소원은 Sucrose, Lactose, Acetate, Citrate, Glucose 등 5가지 탄소원을 사용하였다. 탄소원에 따른 미생물 생육은 모든 미생물이 Fig. 3-50~51과 같이 Sucrose와 Glucose를 첨가한 배지에서 가장 높았으며, 그 다음으로 Lactose, Acetate, Citrate를 첨가한 배지 순으로 생육이 높았다. Acetate는 미생물 3종 모두 생육이 현저히 낮았기 때문에 미생물들이 탄소원으로 이용하지 못한 것 같다. 다양한 연구결과에서 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 배양을 위한 탄소원으로 sucrose를 언급된 바 있으며, 이는 미생물이 다당류보다는 단당류에 대한 선택성이 높기 때문으로 판단된다.



Fig. 3-50. 탄소원 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);탄소원 종류별, (B);미생물 종류별].

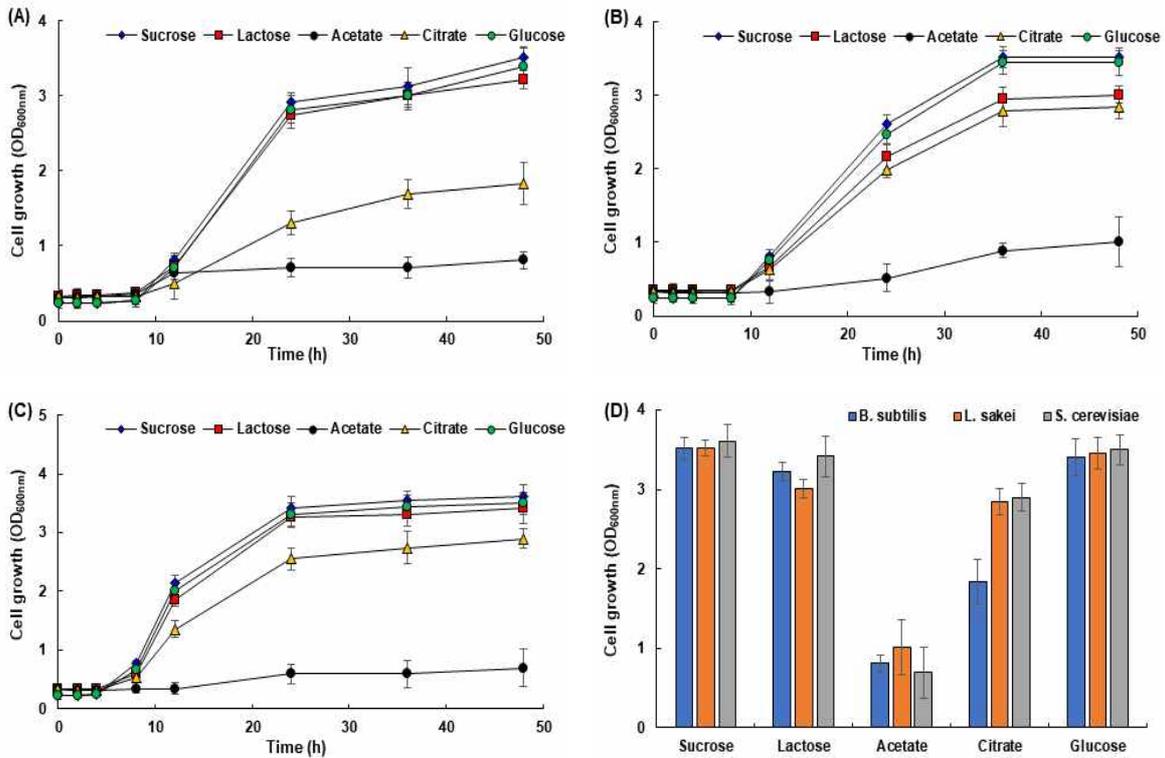


Fig. 3-51. 탄소원 및 미생물 종류별 미생물 생육 특성 [(A);탄소원 종류별 *B. subtilis*의 생육, (B);탄소원 종류별 *L. sakei*의 생육, (C);탄소원 종류별 *S. cerevisiae*의 생육, (D);탄소원 종류별 미생물 3종의 생육].

(다) 미생물 종류별 무기성분에 의한 효과

본 연구는 산업적으로 적용이 가능한 최적배지 조성을 확립하기 위해 미생물의 생육에 필요한 필수 무기성분을 선정하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물을 사용하였으며, 무기성분은 배지에 첨가되는 Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 등 4종의 무기성분 중에서 한가지씩 단독으로 제거하여 균체생육에 큰 영향을 주는 무기성분을 확인하고자 하였다. 실험결과 Fig. 3-52~53에서 보는 바와 같이 제거 시에 가장 많은 영향을 주는 무기성분은 CaCl_2 로 균 생육이 현저하게 낮아졌으며, Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 , MgSO_4 을 각각 제거하였을 때는 균 생육이 Control과 유사한 것으로 보아 생육에 큰 영향을 미치지 못하였다. 미생물 증식에 필요한 필수영양소가 결핍되면 타 영양소의 농도에 관계없이 생장이 제한된다. Yeast extract에는 Ca를 제외한 필수영양소가 다량 존재하기 때문에 Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 , MgSO_4 가 존재하지 않아도 균이 잘 증식하였지만, CaCl_2 를 첨가하지 않은 배지에서 균의 생육이 저하되었다.

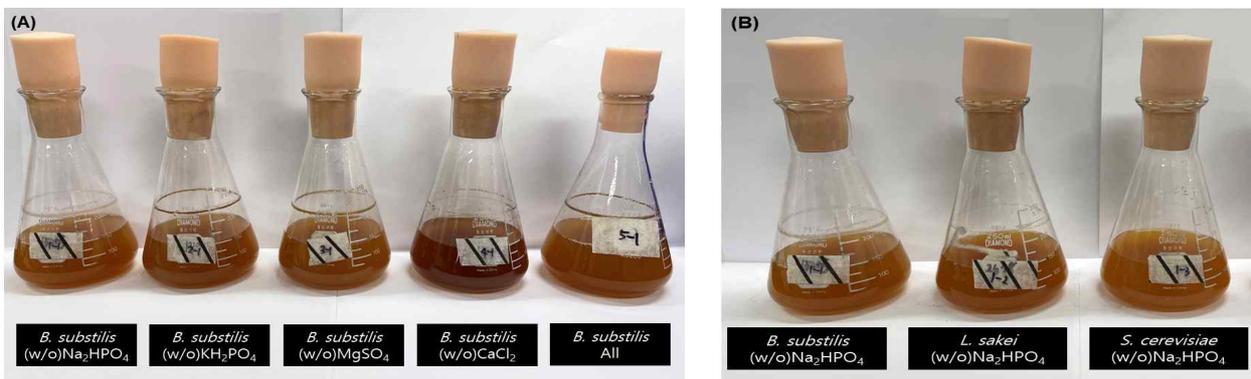


Fig. 3-52. 무기성분 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);무기성분 종류별, (B);미생물 종류별].

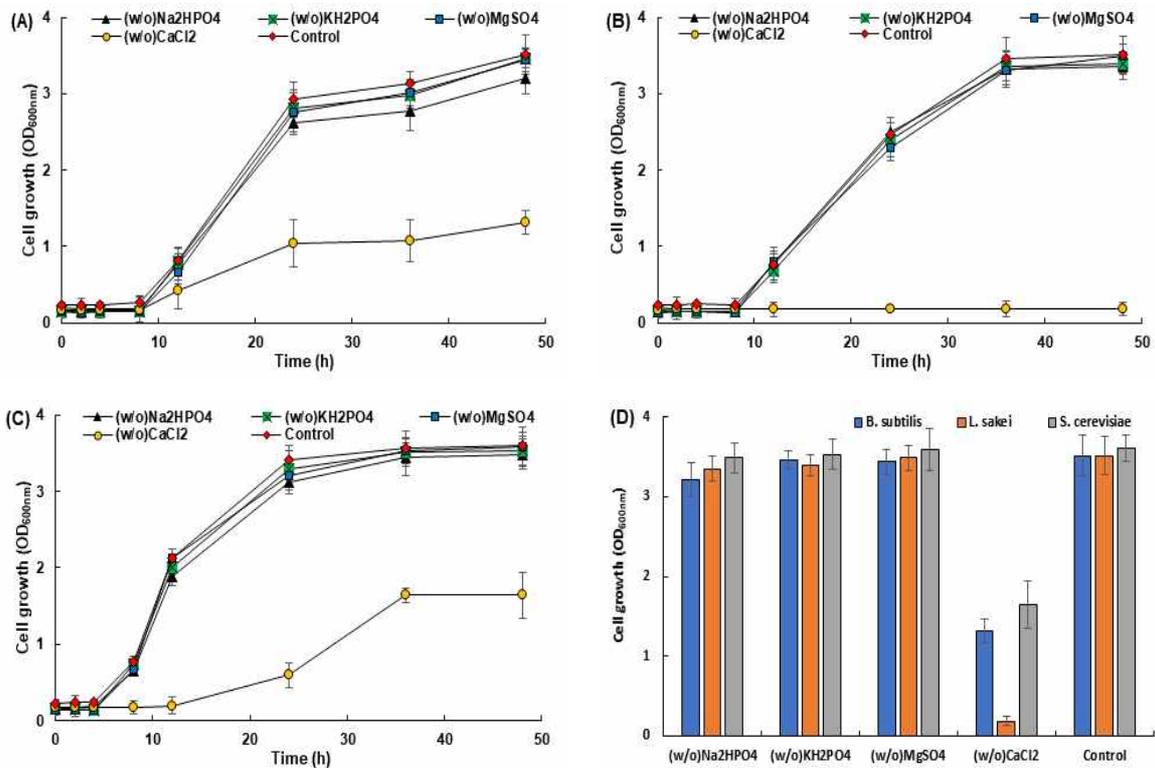


Fig. 3-53. 무기성분 및 미생물 종류별 생육 특성 [(A);무기성분 종류별 *B. subtilis*의 생육, (B);무기성분 종류별 *L. sakei*의 생육, (C);무기성분 종류별 *S. cerevisiae*의 생육, (D);무기성분 종류별 미생물 3종의 생육].

(라) 미생물 종류별 배양온도에 의한 효과

본 연구는 산업적으로 적용이 가능한 최적배지 조성을 확립하기 위해 미생물의 생육에 필요한 최적의 온도를 선정하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물을 사용하였으며, 배양기에서 5, 20, 30, 35℃의 온도조건으로 배양하였으며, 그 결과는 Fig. 3-54~55에서 보는 것과 같다. 본 균주 모두 30~35℃에서 생육이 가장 높았으며, 20℃ 이하에서는 생육이 저하되었고, 특히 5℃에서는 생육이 거의 이루어지지 않은 것을 확인하여 미생물 생육이 온도의 영향을 받았다는 것을 알 수 있었다. 이상의 결과로 퇴비화 시 온도인 40℃ 이상의 고온에서도 생육이 좋을 것으로 판단된다. 일반적으로 *Bacillus subtilis* 균주는 배양온도 25-40℃에서 비교적 양호한 생육이 보인다고 보고하였고, 40℃ 이상의 배양온도에서 생장이 점차 낮아지는 것으로 알려져 있다. 반면에 *L. sakei* 균주는 30℃의 배양온도에서 생육이 가장 높아지는 것으로 알려져 있다. 즉, 배양온도는 배지 내 산소 용해성과 분자의 운동에너지 및 세포 내 반응속도에 영향을 미쳐 결국 균체량에 영향을 주게 되어 각각의 균주별 배양온도의 확립이 중요시되고 있다. 또한 여름철 고온기와 달리 겨울철에는 미생물의 배양 시 가온이 필요하다고 하였으므로 겨울철에는 더 높은 온도가 요구될 것으로 판단된다.

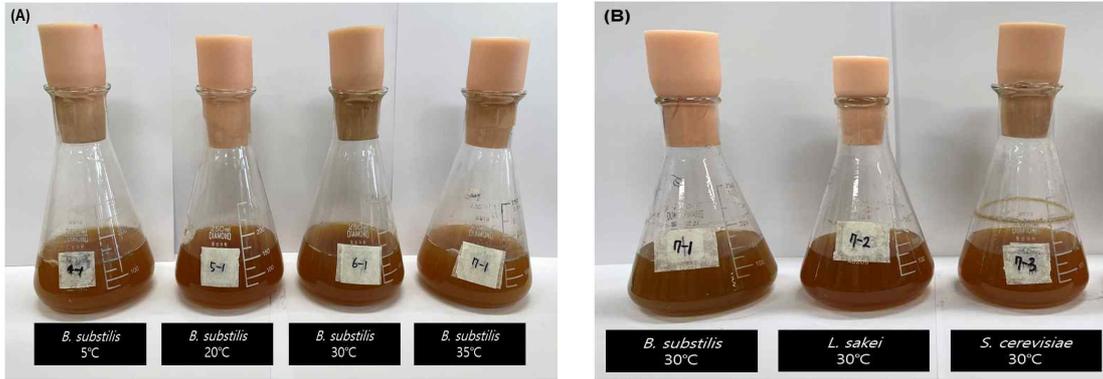


Fig. 3-54. 온도 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);온도별, (B);미생물 종류별].

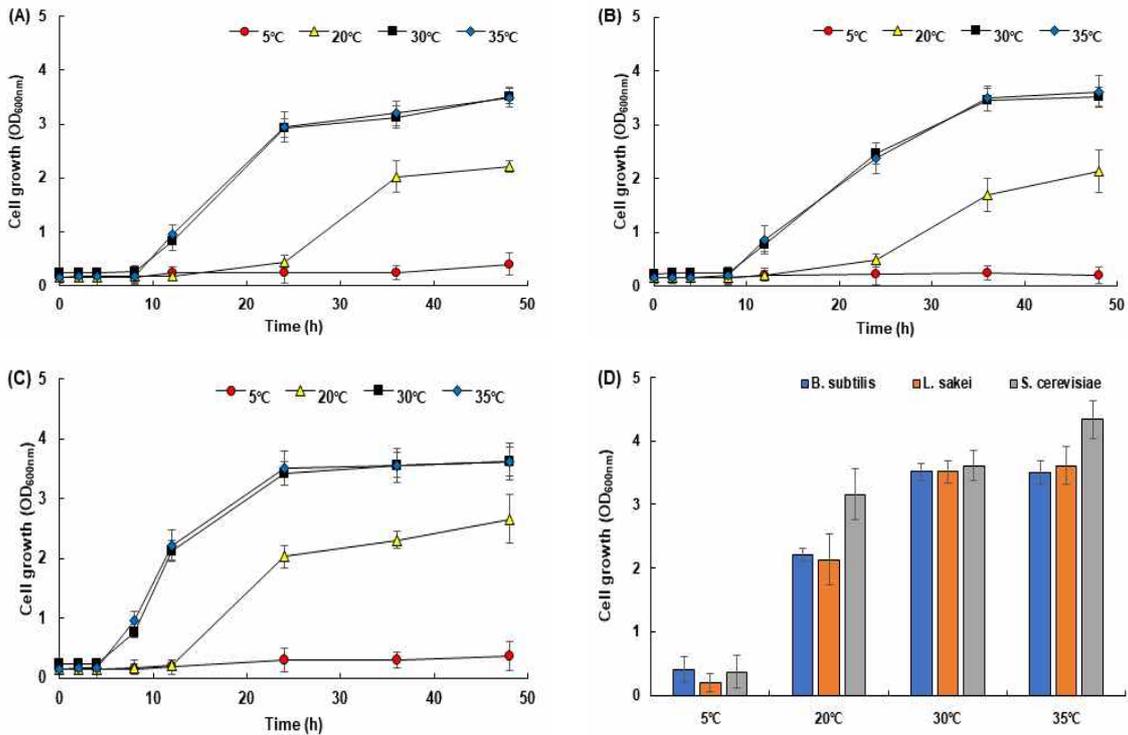


Fig. 3-55. 온도 및 미생물 종류별 생육 특성 [(A);온도별 *B. subtilis*의 생육, (B);온도 별 *L. sakei*의 생육, (C);온도별 *S. cerevisiae*의 생육, (D);온도별 미생물 3 종의 생육].

(마) 미생물 종류별 pH에 의한 효과

본 연구는 산업적으로 적용이 가능한 최적배지 조성을 확립하기 위해 균주의 생육에 필요한 최적의 pH를 선정하고자 하였다. 균주는 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물을 사용하였으며, 배지의 초기 pH는 5, 7, 9로 조절하여 미생물 균수를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 3-56~57에서 보는 바와 같다. 본 연구에서 사용한 균주 3종은 모두 pH 7과 약알칼리인 pH 9에서 생육이 높았으며, pH 5인 조건에서는 균체의 성장이 저하되었다. pH는 균의 성장에 영향을 미치는 주요 인자 중 하나로 알려져 있으며, 일반적인 분뇨의 pH는 7.3~7.8이기 때문에 사용된 균주 모두 분뇨 내에서도 잘 성장할 것으로 판단된다.

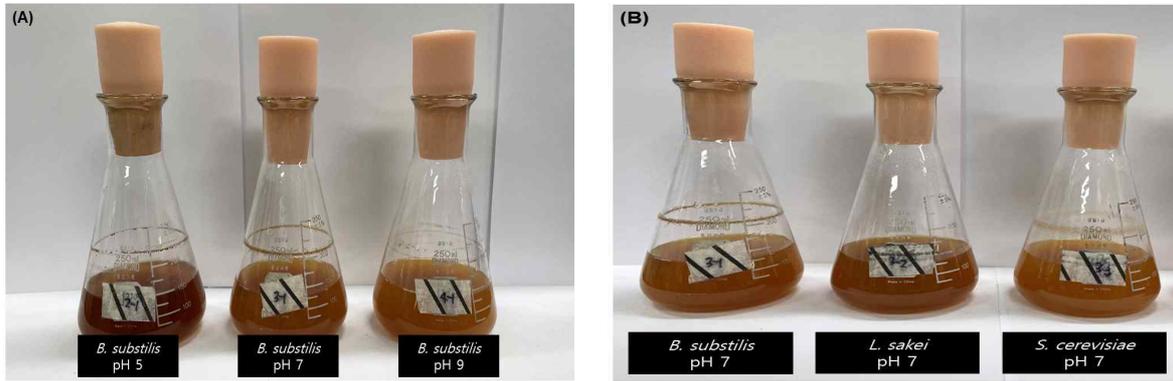


Fig. 3-56. pH 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);pH별, (B);미생물 종류별].

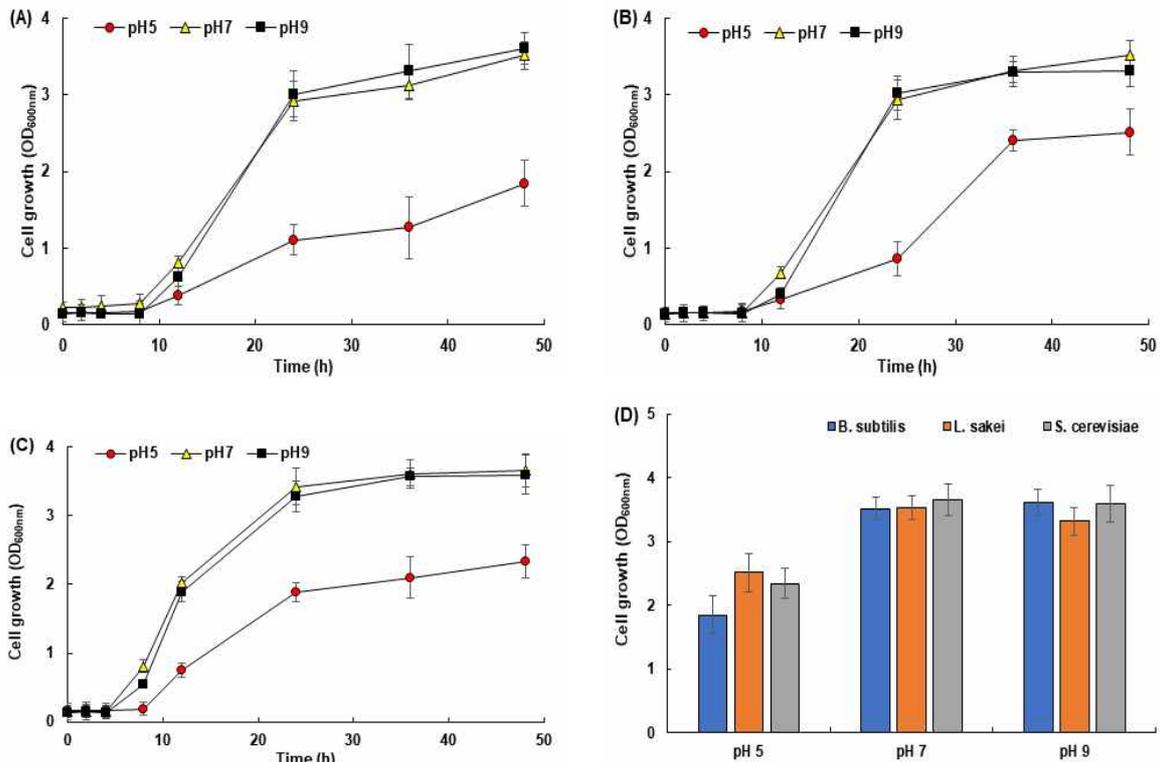


Fig. 3-57. pH 및 미생물 종류별 생육 특성 [(A);pH별 *B. subtilis*의 생육, (B);pH별 *L. sakei*의 생육, (C);pH별 *S. cerevisiae*의 생육, (D);pH별 미생물 3종의 생육].

(바) 미생물 종류별 교반속도에 의한 효과

본 연구는 산업적으로 적용이 가능한 최적배지 조성을 확립하기 위해 미생물의 생육에 필요한 최적의 교반속도를 선정하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일 미생물을 사용하였으며, 배양기에서 60, 160, 230 rpm으로 진탕 배양하였다. 교반속도를 60~230 rpm으로 변화시키면서 균주의 생육에 미치는 영향을 확인한 결과 Fig. 3-58 및 3-59와 같다. 교반속도가 230 rpm까지 증가함에 따라 생육이 서서히 증가하다가 160 rpm 이상에서는 완만한 곡선을 나타내었다. 이상의 결과로 미생물 배양을 위한 교반속도는 160 rpm이 적당한 것으로 판단되었다.

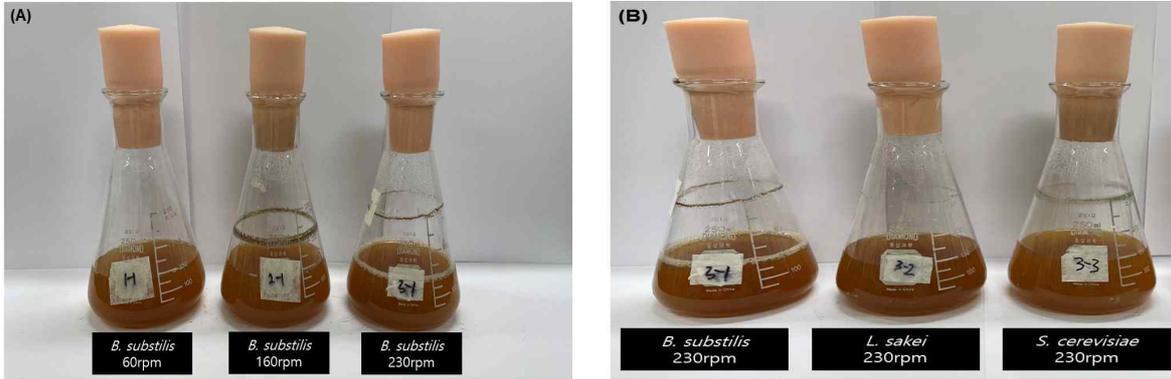


Fig. 3-58. 교반속도 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);교반속도별, (B);미생물 종류별].

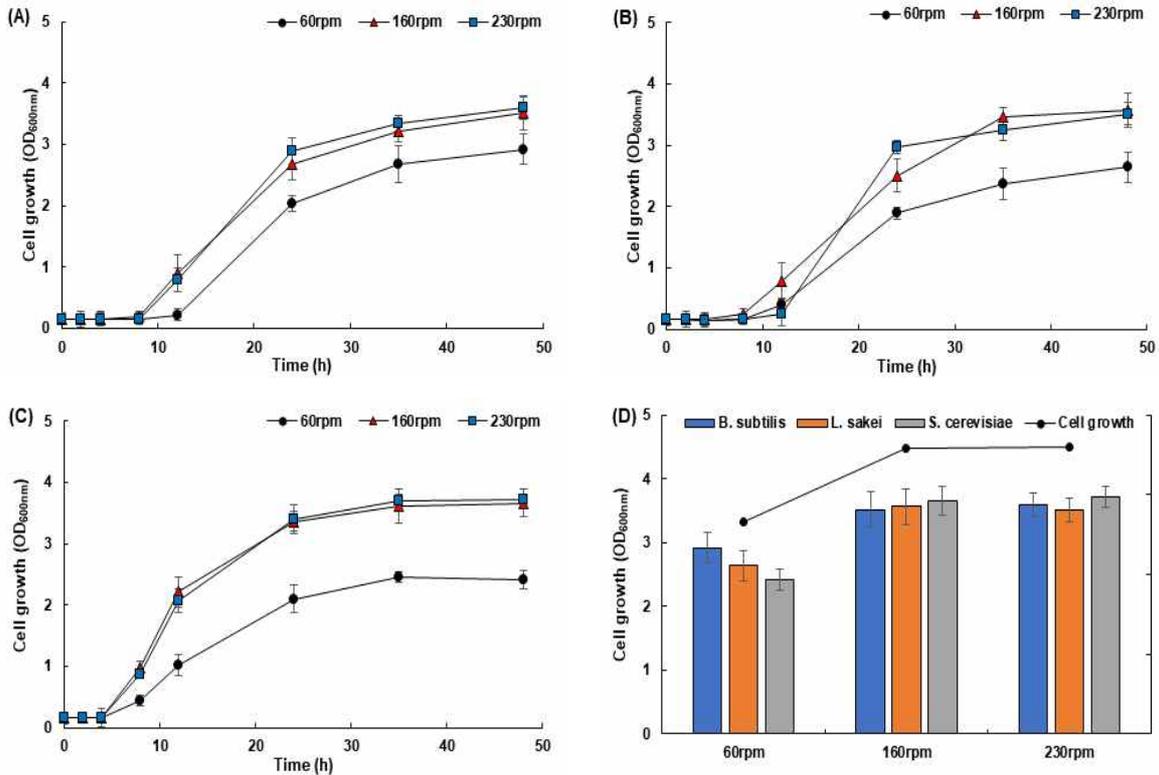


Fig. 3-59. 교반속도 및 미생물 종류별 생육 특성 [(A);교반속도별 *B. subtilis*의 생육, (B); 교반속도별 *L. sakei*의 생육, (C);교반속도별 *S. cerevisiae*의 생육, (D);교반속도별 미생물 3종의 생육].

(사) 미생물 종류별 배양시간에 의한 영향

본 연구는 산업적으로 적용이 가능한 최적배지 조성을 확립하기 위해 미생물의 배양시간에 따른 생육곡선 및 최적 배양시간을 확인하고자 하였다. 균주는 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일균주를 사용하였으며, 168 h 동안 배양하였다. 앞에서 결정한 최적 배양 조건에서 배양시간을 다르게 하면서 균체의 성장을 확인한 결과 (Fig. 3-60), 배양 96h에서 균체의 생육이 최대에 달하였고, 그 이후에는 천천히 감소하였는데 이는 배지 내의 영양성분이 제한적으로 존재하고 있기 때문이다. 특히, 미생물 균주의 생육은 사용된 배지의 종류 및 조성에 따라 최적 배양시간이 다르게 나타나므로 향후 고효율 단기 속성 퇴비화를 위한 깔짚 소재를 개발하기 위해서는 실제 환경과 고품배지의 조성을 고려한 배양시간이 설정돼야 할 것으로 판단된다.

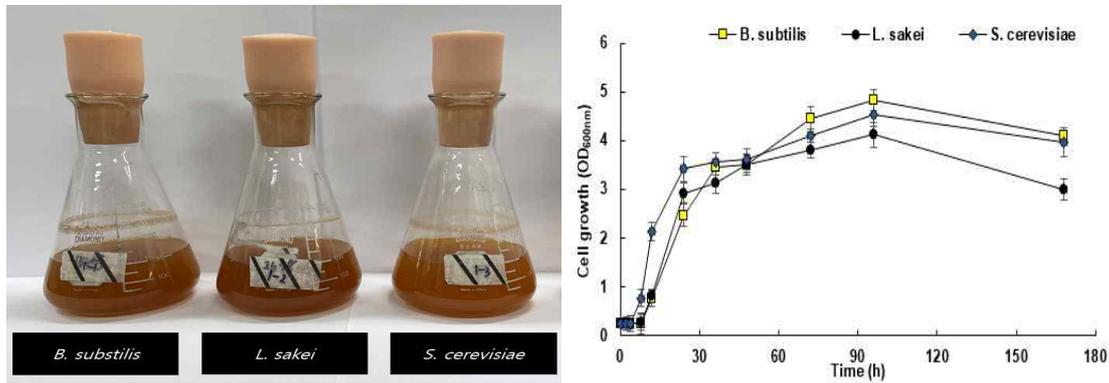


Fig. 3-60. 배양시간별 생육특성.

(아) 미생물 종류별 염분농도에 의한 효과

본 연구는 균체의 성장에 NaCl 농도가 영향을 줄 것으로 판단하여 미생물이 분뇨 내의 염분에서도 생육이 양호한지 내염성을 확인하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물을 사용하였으며, 배지의 염분농도를 0, 0.05, 1, 2, 2.5%로 맞추어 주었다. NaCl 농도를 다르게 한 배지에서 균주의 생육특성을 확인한 결과 Fig. 3-61~62와 같았다. 1~2.5%의 염분농도에서는 유사한 생육을 보였으며, 0~0.05%의 염분농도에서는 다소 낮은 생육을 보였다. 이상의 결과로 염분이 2% 존재하는 분뇨 내에서도 3종의 균주 모두 잘 성장할 것으로 판단된다. NaCl의 구성이온인 Na⁺와 Cl⁻이 미생물 생육에 있어 촉매 역할을 한다는 연구 결과와 유사하게 본 연구에서도 적절한 농도의 NaCl은 미생물 생육에 있어서 좋은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 일반적으로 *Bacillus* 속의 생육 가능한 염분농도는 0~5%이었으며, 최적 염분농도는 2~3%이었고, 7% 이상의 염분농도에서는 균의 증식이 어려운 것으로 보고하였다. *L. sakei* 균주의 경우 3%의 NaCl농도까지는 잘 성장하였고 7% NaCl에서는 느리게 성장하였고 10% NaCl에서는 성장하지 못하였다고 보고하였다. 일반적으로 비료공정규격상 퇴비품질검사 기준 가축분퇴비의 염분 함량은 2%이하로 규정하고 있기 때문에 염분농도가 높은 배지를 조성하여 깔짚 소재와 같은 고품배지에 접종할 경우 생산된 퇴비 내에 염분농도가 증가될 우려가 있기 때문에 가급적 액상 배지 내에 염분농도는 낮은 것이 퇴비생산에 효과적일 것으로 판단된다.

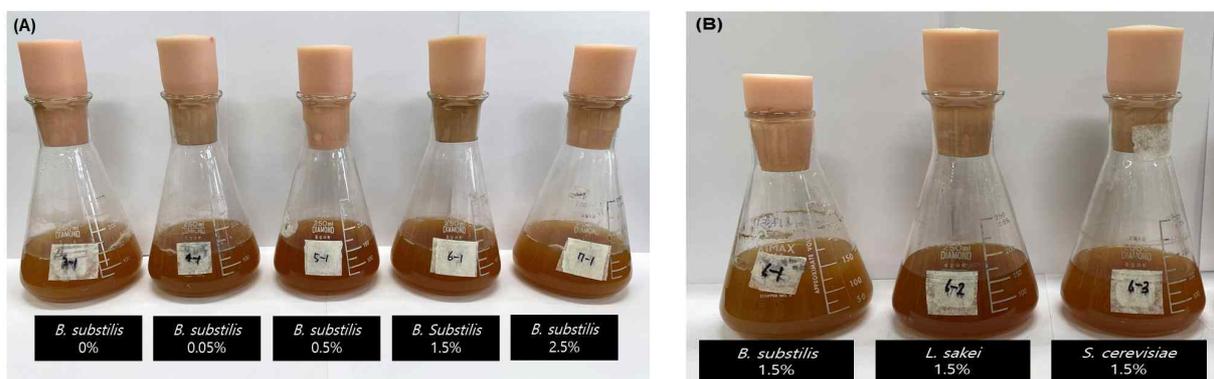


Fig. 3-61. 염분농도 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);염분농도별, (B);미생물 종류별].

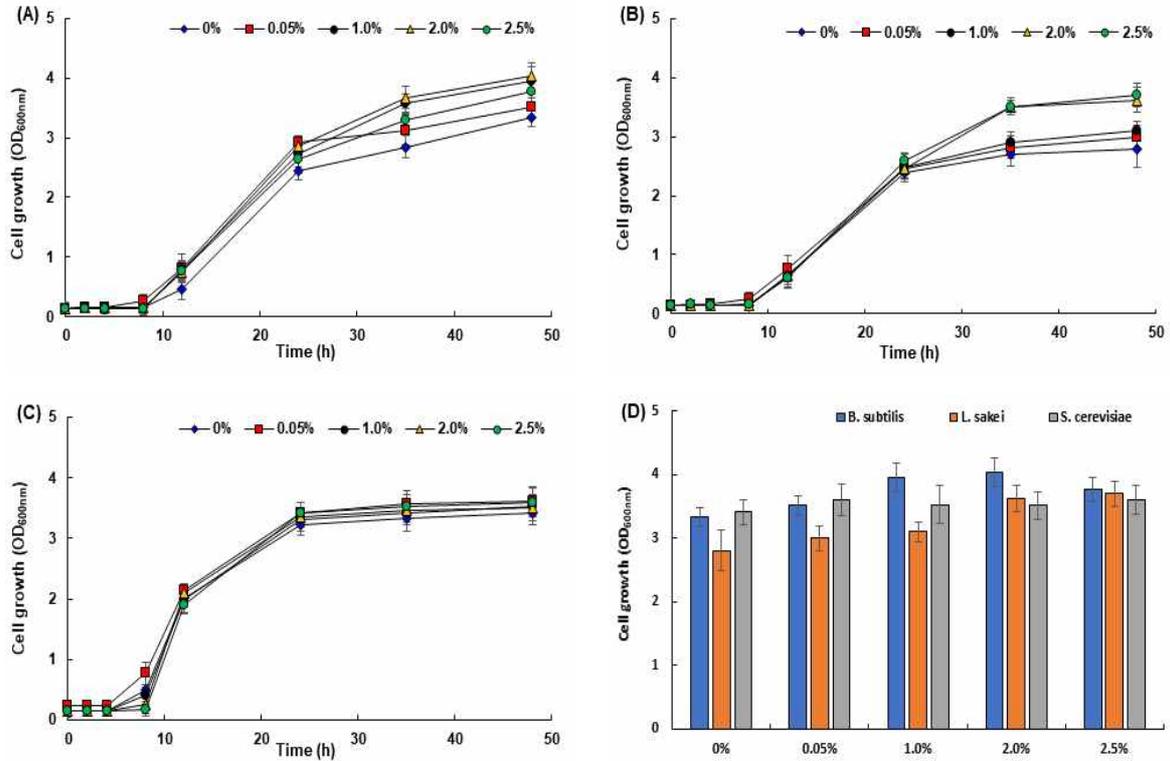


Fig. 3-62. 염분농도 및 미생물 종류별 생육 특성 [(A);염분농도별 *B. subtilis*의 생육, (B); 염분농도별 *L. sakei*의 생육, (C);염분농도별 *S. cerevisiae*의 생육, (D);염분농도별 미생물 3종의 생육].

(2) 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물 대량배양 공정개발

(가) 살균 및 멸균 배양기 제작 및 시운전

축사바닥 깔짚 소재에 적용하기 위한 미생물을 대량배양하기 위해서 상기 (1)항에서 언급된 최적 조건들을 모두 만족할 수 있는 시스템을 설계 및 제작하였으며, 그 결과와 전경은 Fig. 3-63에서 보는 바와 같다. 미생물의 생육에 적합한 환경을 조성하기 위하여 온도부, 통기부 및 살균부가 설치되어 있으며, 퇴비화조 내에서 미생물을 균질화하기 위한 교반장치가 구축되어 있다. 또한 외부에는 대량미생물 배양조의 온도 및 통기시스템을 조절할 수 있는 콘트롤 박스가 설치되어 있다.

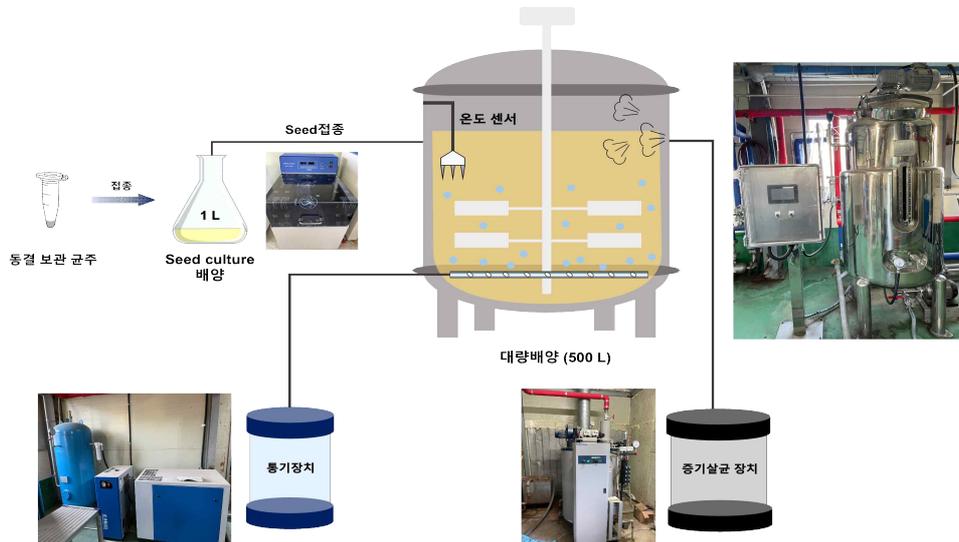


Fig. 3-63. 미생물 살균 및 멸균 배양기 시운전 과정

제작된 미생물 배양기에서 *Bacillus subtilis*, *Sacchromyces ceriviae* 및 *Lactobacillus sakei* 를 미생물 최적조건에서 배양한 결과, 미생물의 배양이 정상적으로 진행되어 미생물 3종 모두 최종 생균수가 5×10^6 CFU/mL 이상이였다 (Fig. 3-64). 따라서 본 연구에서 제작된 미생물 배양기는 축사바닥 깔짚 소재 적용 미생물을 대량 배양하기 위해서 사용되기에 적합하였다.

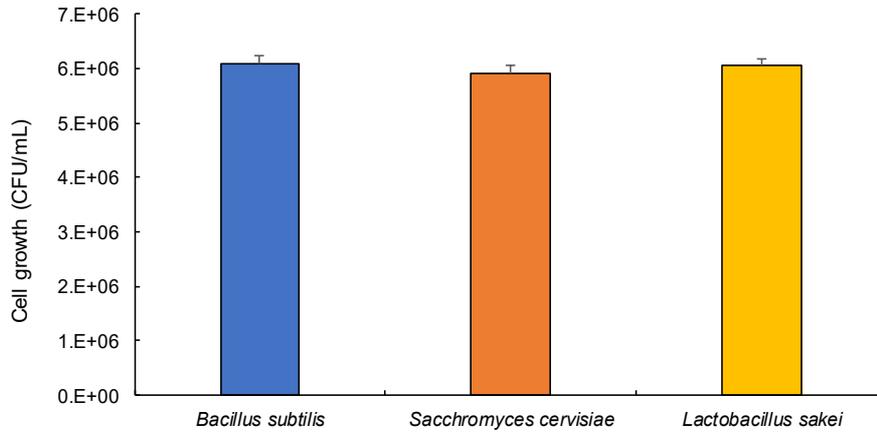


Fig. 3-64. 미생물 배양기 시운전 시 미생물 생육.

(나) 미생물 종류별 물리·화학적 배양조건 검토

상기 (1)항의 Lab-scale 규모의 실험에서 도출된 연구 결과들이 대량배양 공정에도 적용될 수 있는지 검토하였으며, 그 결과는 Fig. 3-65에서 보는 바와 같다. 본 실험에 사용된 모든 미생물은 대규모 배양조건에서도 lab-scale 실험과 동일한 수준으로 미생물이 성장하는 것을 확인할 수 있었고, 이 결과로 인하여 미생물의 대량배양 공정을 위한 미생물 최적 배양조건을 확립할 수 있었다.

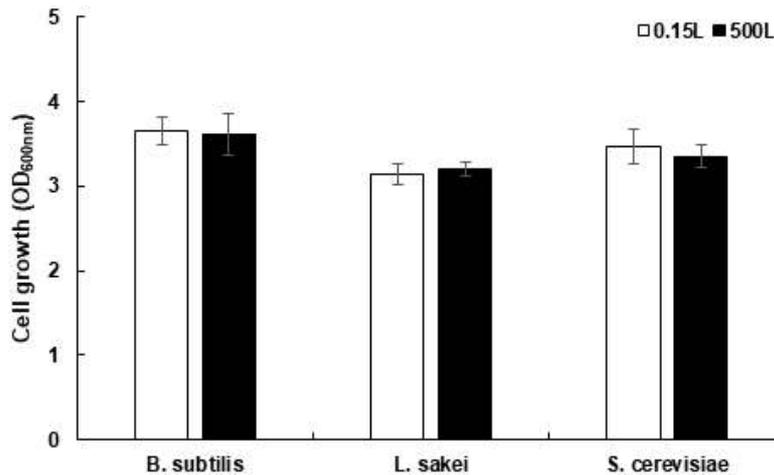


Fig. 3-65. 소규모 배양 및 대량 배양에 따른 미생물 생육 활성.

(다) 최적 배양조건 도출

미생물을 대량 배양하기 위해서 우선 동결 보관되어있는 균주를 1 L로 배양하여 활성화시킨다. 이때 최적 배양배지의 조성은 Sucrose 10 g/L, Yeast extract 5 g/L, Na₂HPO₄ 6 g/L, KH₂PO₄ 3 g/L, NaCl 0.5 g/L, MgSO₄ 0.24 g/L, CaCl₂ 0.01 g/L 이었고, 교반속도, 배양온도 및 배양시간은 160 rpm, 30°C 및 48 h이었다. 활성화된 미생물을 동일한 조성으로 제조된 500 L 배양액에 전량 투입하였으며, 동일한 교반속도, 배양온도 및 배양시간으로 대량 배양하였다 (Fig. 3-66). 다음과 같은 조건으로 배양된 미생물은 축사바닥 깔짚 소재로써 적용 및 활용될 수 있을 것이다.

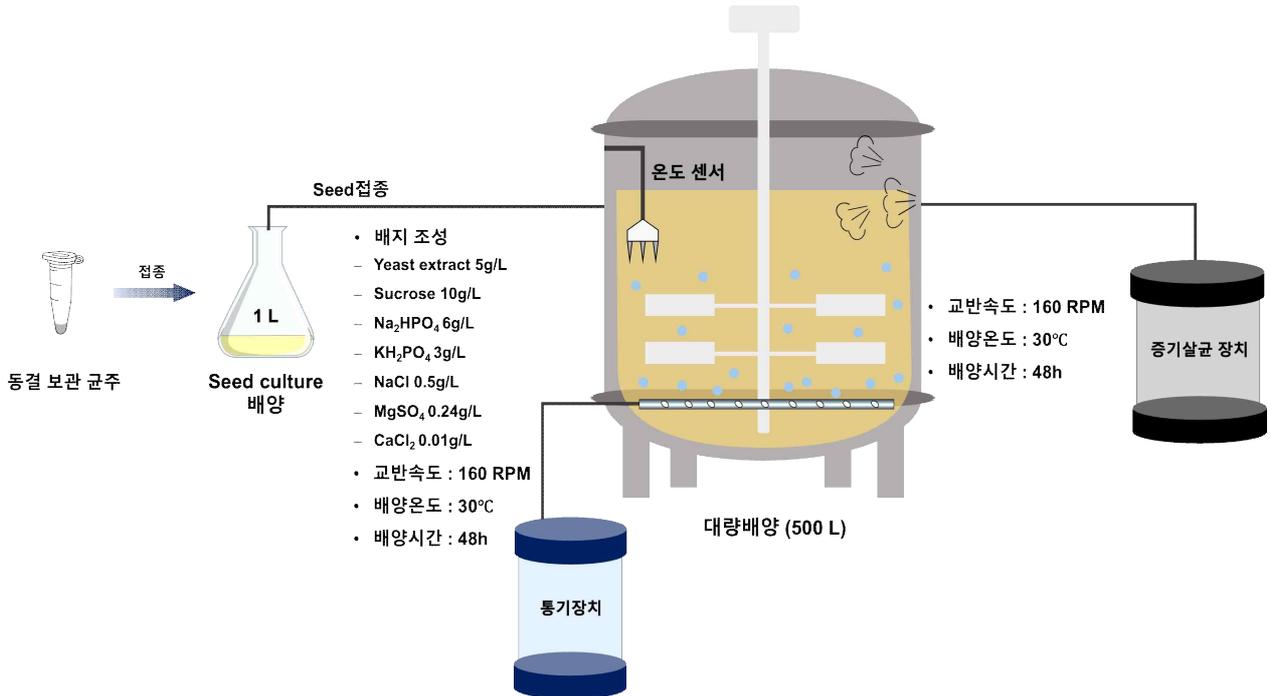


Fig. 3-66. 미생물 대량배양 모식도 및 최적 배양 조건.

(3) 혼합미생물 배양조건 및 공정 개발

(가) 미생물 혼합비율별 배양 최적 공정 확립

Bacillus subtilis, *Sacchromyces cerevisiae* 및 *Lactobacillus sakei*의 혼합비율에 따른 미생물 생육특성 분석 결과, *Lactobacillus sakei*가 투입되는 비율이 높을수록 미생물의 초기 생육속도가 상대적으로 느렸고, *Bacillus subtilis*의 비율이 높을수록 미생물의 초기 생육속도가 빨랐으며, *Sacchromyces cerevisiae*의 투입되는 비율이 높을 때는 미생물 3종이 동일한 비율로 혼합되었을 때와 생육속도가 거의 유사하였다 (Fig. 3-67). 미생물 배양 24 h 이후에는 *Bacillus subtilis*가 투입되는 비율이 높은 MM2 처리구를 제외하고 미생물의 생육의 활성은 큰 차이가 없었으며, MM2처리구의 미생물 생육 활성은 상대적으로 높았다. 배양 48h에 최종 미생물의 OD₆₀₀은 MM2(3.913) > MM1(3.454) > MM4(3.441) > MM3(3.546)순으로 높았다. 따라서 혼합미생물을 배양하기 위한 각 단일 균주의 최적 혼합비율은 *Bacillus subtilis*:*Sacchromyces cerevisiae*:*Lactobacillus sakei* = 2:1:1 이었다.

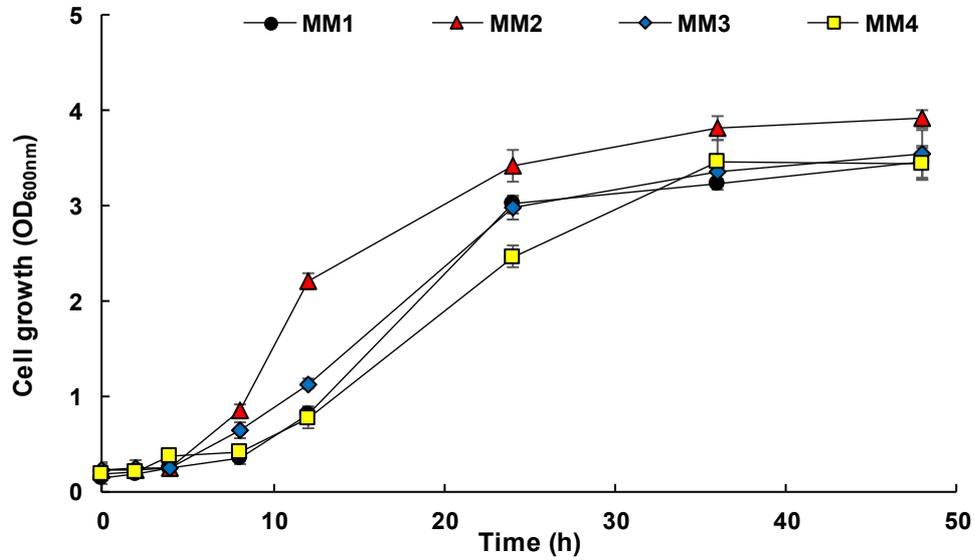


Fig. 3-67. 각 단일 균주의 혼합비율에 따른 미생물 생육

(MM1 : *Bacillus subtilis* : *Sacchomyces cerevisiae* : *Lactobacillus sakei* = 1:1:1,
 MM2 : *Bacillus subtilis* : *Sacchomyces cerevisiae* : *Lactobacillus sakei* = 2:1:1,
 MM3 : *Bacillus subtilis* : *Sacchomyces cerevisiae* : *Lactobacillus sakei* = 1:2:1,
 MM4 : *Bacillus subtilis* : *Sacchomyces cerevisiae* : *Lactobacillus sakei* = 1:1:2).

(나) Seed 액상배양 공정 확립

주입되는 seed량에 따른 혼합미생물의 생육 특성을 분석한 결과, 미생물 배양 4시간까지 미생물의 생육에 큰 차이가 없었지만 배양 8시간부터 seed 주입량에 따라서 미생물의 생육에 차이를 나타냈다 (Fig. 3-68). 특히, 주입되는 seed량이 0.5에서 1%로 증가함에 따라서 미생물의 생육이 왕성하였다. 하지만, seed 주입량이 1, 5 및 10%로 증가하여도 배양 24시간부터는 미생물의 생육은 거의 유사하였으며, 배양 48시간까지 큰 차이가 없었다. 본 연구 결과를 통해서 seed 액상배양할 때는 seed 주입량을 1%보다 초과하여 처리할 필요성이 없다고 판단하였다. 따라서 seed 액상배양을 위한 최적 seed 주입량은 1%이었다. 주입 공기압에 따른 혼합미생물의 생육 특성을 분석한 결과, 공기압이 0.1에서 0.5 vvm으로 증가하였을 때 미생물의 생육이 더욱 활발해졌다. 공기압이 0.7 vvm이상 일 때는 0.5 vvm과 미생물의 생육이 거의 유사하여 큰 차이가 없었다. 따라서 혼합미생물을 배양 할 때의 최적 공기압은 0.5 vvm이었다.

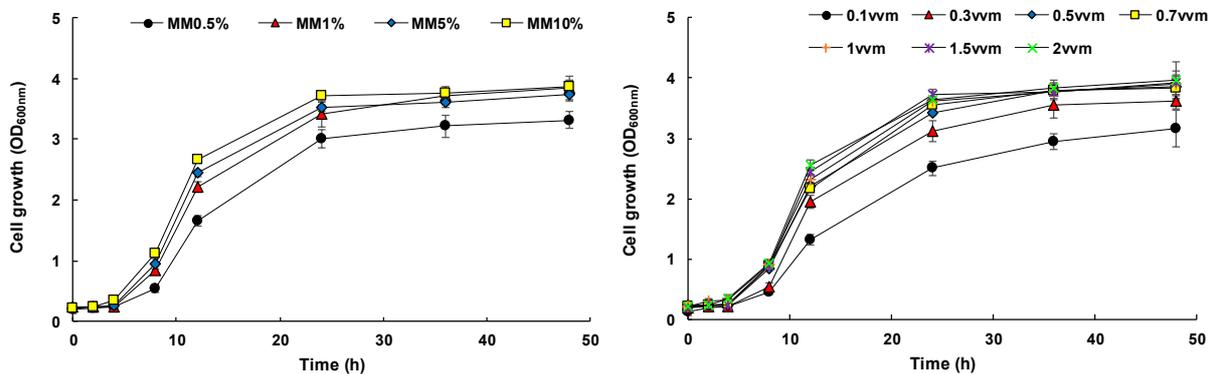


Fig. 3-68. Seed 주입량 및 공기압에 따른 혼합미생물 생육.

(다) 고상발효 공정 확립

혼합미생물을 각 부형제에 1%주입하고, 30°C에서 1차 발효한 결과, 미생물 배양 4시간까지는 부형제에 따른 미생물의 생육이 유사하였으며, 배양 8시간부터 미생물의 생육에 차이를 보였다 (Fig. 3-69). 특히, 미강과 밀기울을 사용하여 발효하였을 때는 미생물의 생육이 가장 활발하게 일어났으며, 대두박, 탄지강 순으로 미생물의 생육이 왕성하였다. 따라서 미생물의 1차 고상발효를 위한 최적 부형제는 미강과 밀기울이었으며, 이들의 혼합비율에 따른 미생물의 생육을 비교하였다. 미강(RB)과 밀기울(WB)을 2:1, 1:1 및 1:2로 혼합하여 1차 발효를 하였을 때 $RB:WB=1:1(3.5 \times 10^6 \text{ CFU/mL}) > RB:WB=1:2(3.3 \times 10^6 \text{ CFU/mL}) > RB:WB=1:2(3.2 \times 10^6 \text{ CFU/mL})$ 순서로 미생물의 생균수가 많았다. 따라서, 1차 고상발효의 최적 부형제는 미강과 밀기울을 1:1로 혼합한 것이었다.

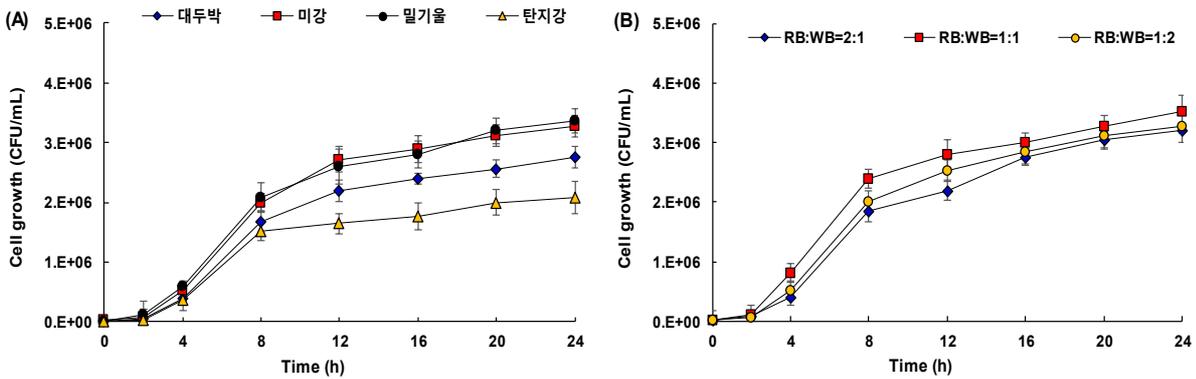


Fig. 3-69. 1차 고상발효 부형제 종류 및 혼합비율에 따른 미생물 생육.

1차 발효가 완료된 후 2차 발효를 위한 각각의 부형제를 투입하였을 때 미생물의 생육을 분석한 결과, 1차 발효 후 2차 발효 부형제를 투입한 직후 미생물의 생육이 약간 감소하였지만 시간이 지남에 따라 다시 증가하는 경향이였다 (Fig. 3-70). 각 단일 부형제 투입 시 미생물의 생육은 피트모스, 코코피트, 바이오차 순으로 활발하였으며, 코코피트와 바이오차 투입 시 미생물 생육은 거의 유사한 수준이었다. 하지만, 이들을 같은 비율로 혼합하여 처리하였을 때 미생물 생육이 단일로 처리하였을 때보다 훨씬 더 왕성한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 2차 발효 시 피트모스, 코코피트 및 바이오차의 혼합비율에 따른 미생물의 생육을 비교 분석하였다. 바이오차, 코코피트 및 피트모스를 2:1:1, 1:2:1, 1:1:2, 3:1:1, 1:3:1 및 1:1:3 비율로 혼합하여 2차 발효를 한 결과, 피트모스가 혼합된 비율이 높을수록 미생물의 생육이 왕성한 경향이였으며, 다른 혼합비율에서는 미생물의 생육에 유의적인 차이가 없었다. 따라서 2차 발효를 위한 부형제의 최적 혼합비율은 바이오차:코코피트:피트모스 = 1:1:3 이었다.

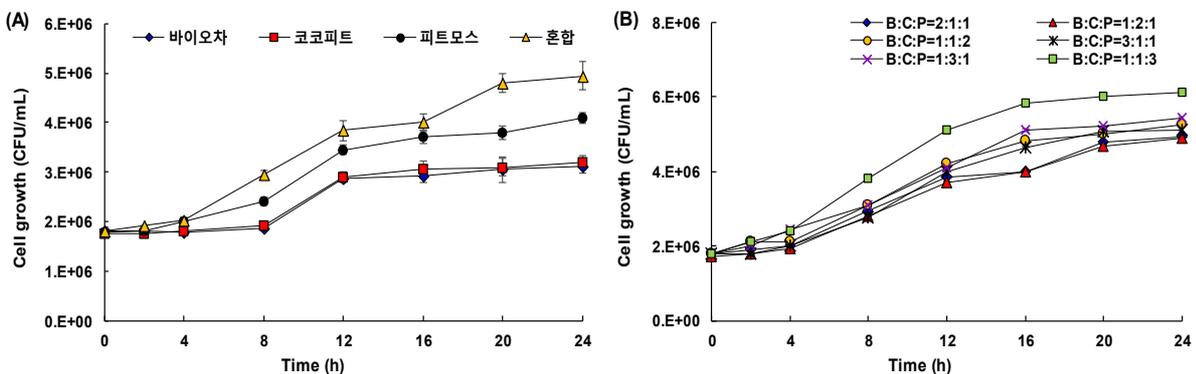


Fig. 3-70. 2차 고상발효 부형제 종류 및 혼합비율에 따른 미생물 생육.

고상발효 시 주입된 seed량과 배양온도 및 배양시간에 따른 미생물의 생육활성을 분석한 결과, 1차 발효를 할 때 seed량이 50%까지 증가함에 따라서 미생물의 생육이 활발하였다. 하지만 2차 발효과정까지 거친 후에는 주입된 seed량이 1%를 초과하였을 때는 seed량에 따라 미생물의 생육은 유의적인 차이가 없었다 (Table 3-53).

1차 발효 시 배양온도가 10에서 35℃까지 증가함에 따라 미생물의 생육이 유의적으로 왕성해지는 경향이었으며, 40℃이상일 때는 오히려 배양온도가 증가함에 따라 미생물의 생육이 쇠퇴하였다. 2차 발효 시에도 1차 발효와 동일한 경향이였다. 따라서 고상발효를 위한 미생물의 최적 배양온도는 35℃이었다.

1차 발효와 2차 발효 시 배양시간이 4시간에서 24시간으로 지남에 따라 미생물의 생육은 더욱 활발해졌다. 1차 발효 시에는 배양시간이 24시간과 48시간일 때 미생물의 생육은 거의 유사하였지만, 2차 발효의 배양시간이 24 h을 초과하였을 때는 미생물의 생육이 쇠퇴하였다. 따라서 미생물의 고상발효를 위한 최적 주입 seed량은 1%이고, 배양온도는 35℃, 배양시간은 각각 1차 발효 24 h, 2차 발효 24 h이었다.

Table 3-53. Seed량, 배양온도 및 배양시간에 따른 미생물 생육

실험조건	처리수준	1차 발효	2차 발효
		----- CFU/mL -----	
Seed량	0.5%	2.1x10 ⁵	5.1x10 ⁵
	1.0%	3.4x10 ⁶	6.5x10 ⁶
	5.0%	4.1x10 ⁶	6.7x10 ⁶
	10.0%	4.4x10 ⁶	6.8x10 ⁶
	20.0%	4.5x10 ⁶	6.6x10 ⁶
	50.0%	4.7x10 ⁶	6.5x10 ⁶
배양온도	10℃	5.2x10 ³	7.6x10 ³
	20℃	3.3x10 ⁵	9.2x10 ⁵
	30℃	3.5x10 ⁶	6.4x10 ⁶
	35℃	4.2x10 ⁶	7.2x10 ⁶
	40℃	3.9x10 ⁶	5.4x10 ⁶
	45℃	3.4x10 ⁶	2.9x10 ⁶
배양시간	4h	8.1x10 ⁵	1.8x10 ⁶
	8h	2.4x10 ⁶	2.4x10 ⁶
	12h	2.8x10 ⁶	5.1x10 ⁶
	24h	3.6x10 ⁶	7.1x10 ⁶
	48h	3.7x10 ⁶	5.8x10 ⁶

고상 미생물제를 깔짚 소재로써 활용하기 위한 최적 수분함량은 약 30%, 미생물의 생균수는 1x10⁶ CFU/mL로 설정하였다. 미생물제의 건조온도 및 건조시간에 따른 미생물제의 수분함량 및 생균수를 분석한 결과, 건조온도가 40~45℃로 증가함에 따라 미생물제의 수분함량은 12 h 안에 30% 이내로 낮아졌지만, 미생물의 생균수가 4.4x10⁵ 이하로 보증 생균수인 1x10⁶ CFU/mL 기준을 충족하지 못하였다 (Table 3-54). 최적 수분함량과 미생물의 생균수

를 충족하는 건조온도 및 시간은 35℃, 24h이었다.

Table 3-54. 건조온도 및 시간에 따른 미생물 생균수

		0h	12h	24h	48h
		----- 수분함량 (%) -----			
건조온도	30℃	45	40.2	35.1	33.3
	35℃	46.2	35.5	30.5	24.2
	40℃	45.7	30.2	25.5	18.7
	45℃	46.1	28.1	21.2	15.6
		----- 미생물 균수 (CFU/mL) -----			
건조온도	30℃	7.1x10 ⁶	6.9x10 ⁶	6.7x10 ⁶	6.1x10 ⁶
	35℃	7.2x10 ⁶	6.8x10 ⁶	6.5x10 ⁶	5.2x10 ⁶
	40℃	7.1x10 ⁶	4.4x10 ⁵	1.4x10 ⁵	1.1x10 ⁴
	45℃	7.0x10 ⁶	2.5x10 ⁵	3.1x10 ⁴	6.3x10 ³

(라) 고상흡착 공정 확립

고상발효를 위한 부형제의 최적 조건을 활용하여 고상흡착에 적용하였을 때 seed량에 따른 미생물의 생육을 분석한 결과, 모든 seed 주입량 조건에서 고상흡착이 고상발효에 비해 미생물의 활성이 매우 낮았다 (Table 3-55). 따라서 본 연구에서 혼합미생물의 최적 고상 미생물제 제조공정은 고상발효 공정이었다. 고상발효를 위한 부형제의 최적 조건을 활용하여 고상흡착에 적용하였을 때 seed량에 따른 미생물의 생육을 분석한 결과, 모든 seed 주입량 조건에서 고상흡착이 고상발효에 비해 미생물의 활성이 매우 낮았다. 따라서 본 연구에서 혼합미생물의 최적 고상 미생물제 제조공정은 고상발효 공정이었다.

Table 3-55. 고상발효 및 고상흡착 시 seed 주입량에 따른 미생물 생육

		Solid fermentation		Solid adsorption
		1차	2차	
		----- CFU/mL -----		
Seed량	0.5%	2.1x10 ⁵	5.1x10 ⁵	1.3x10 ¹
	1.0%	3.4x10 ⁶	6.5x10 ⁶	4.2x10 ²
	5.0%	4.1x10 ⁶	6.7x10 ⁶	2.2x10 ³
	10.0%	4.4x10 ⁶	6.8x10 ⁶	4.4x10 ³
	20.0%	4.5x10 ⁶	6.6x10 ⁶	3.2x10 ⁴
	50.0%	4.7x10 ⁶	6.5x10 ⁶	8.9x10 ⁴

(마) 원료의 부형제 확립

고상발효에 사용되는 최적 부형제의 확립 과정은 Fig. 3-71과 같다. 최적 조건에서 배양된 혼합미생물을 부형제의 1%로 주입하였을 때 1차 발효과정에서의 최적 부형제는 미강과 밀기울을 1:1 비율로 혼합한 것이었으며, 2차 발효과정에서의 최적 부형제는 바이오차, 코코피트 및 피트모스를 1:1:3 비율로 혼합한 것이었다. 발효가 완료된 고상 미생물제를 최적 조건에서 건조하면 깔짚 소재로 활용하기 위한 최적 고상발효 미생물제의 제조가 완료된다.

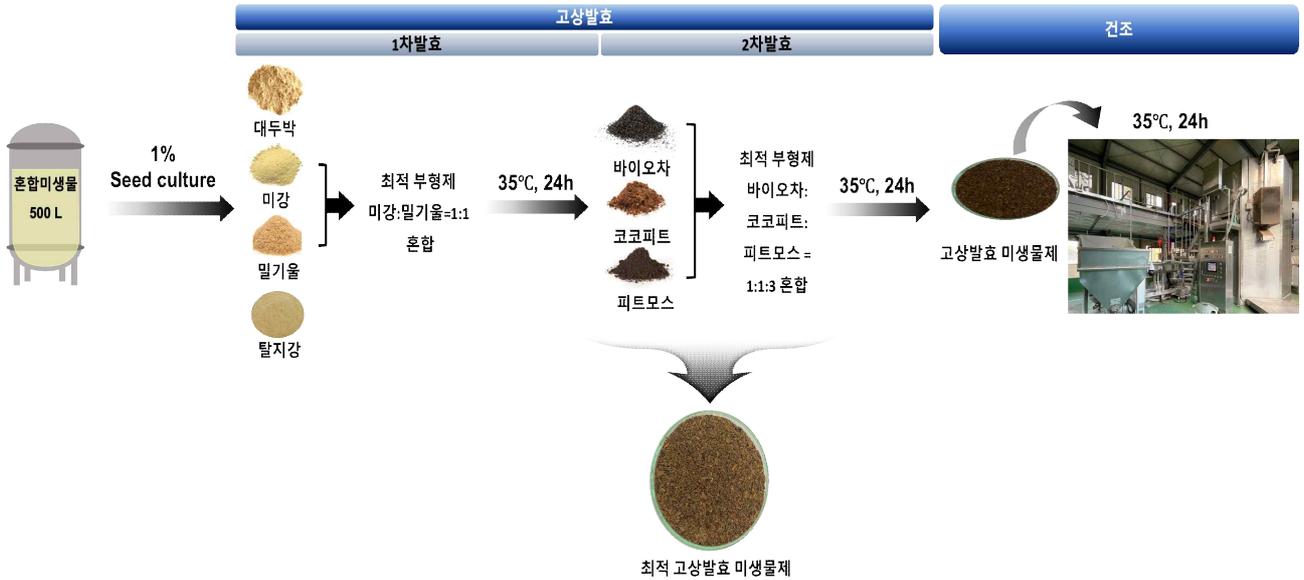


Fig. 3-71. 고상발효를 위한 부형제의 확립 과정 및 최적 고상발효 미생물제 성상

(바) 깔짚 적용 미생물 시제품의 pilot test

개발된 혼합미생물제를 깔짚 소재로서 적용 시험을 하기 위해서 사천에 위치한 축사에 고상 혼합미생물제를 처리한 후 깔짚 소재로서의 적합성을 평가하였다.

(4) 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 생산공정 개발

(가) 탄소/질소 제어율 조절 기술 확립

본 연구는 퇴비화 시 미생물이 분뇨 내 C/N비가 높은 환경에서도 잘 생육하는지 확인하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물을 사용하였으며, 배지의 C/N비를 10, 20, 30, 50으로 조절하였다. C/N비에 따른 미생물 생육은 모든 미생물이 Fig. 3-72~73와 같이 C/N비가 50으로 증가함에 따라 미생물 생육도 조금씩 증가하여 30부터는 눈에 띄는 생육차이를 보이지 않았고, C/N비가 10일 경우에는 미생물 생육이 현저히 낮아졌다. 퇴비화 시 초기 C/N비는 25~30:1이므로, 본 연구에서 사용한 균주는 퇴비화에 적합한 균이라는 것을 알 수 있었다. 퇴비화 조건 중 C/N비는 미생물 활성화에 중요한 인자로 미생물 생육에 적합한 C/N비는 25~35이며 이보다 낮을 경우, 질소가 암모니아 가스로 휘발되며, 50이상으로 과도하게 높을 경우 질소기아가 발생해 미생물의 활동이 제한된다. 퇴비화를 위한 최적 C/N비로 25:1~30:1을 초기 조건으로 맞추고, 퇴비화 미생물균으로 *B. subtilis*, *Thiobacillus*, *T. ferrooxidans*, *pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas fluorescens*를 사용하였다. 높은 C/N비는 미생물 성장의 제한 요인이 되지만, 반대로 낮은 C/N비는 질소가 과잉되고 퇴비화 과정 중 발생하는 배기가스 내의 암모니아가 증가하여 질소원의 손실을 야기한다.

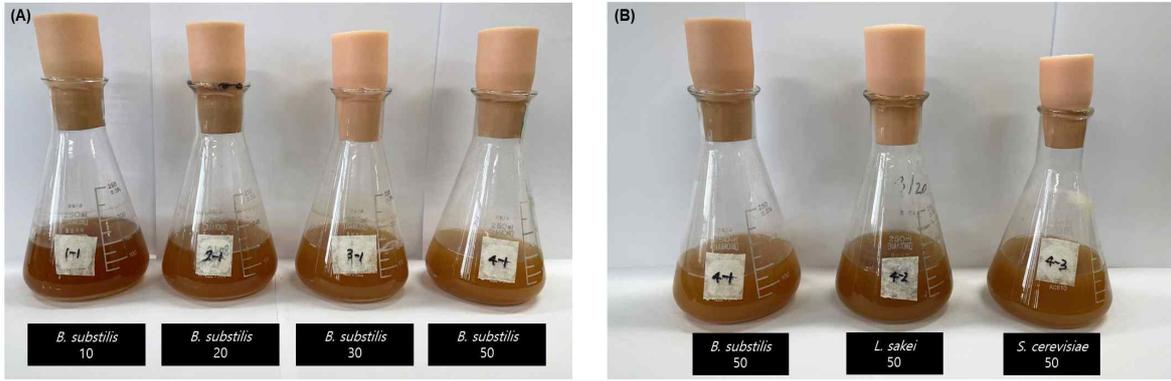


Fig. 3-72. C/N 및 미생물 종류별 생육전경 [(A);C/N비별, (B);미생물 종류별].

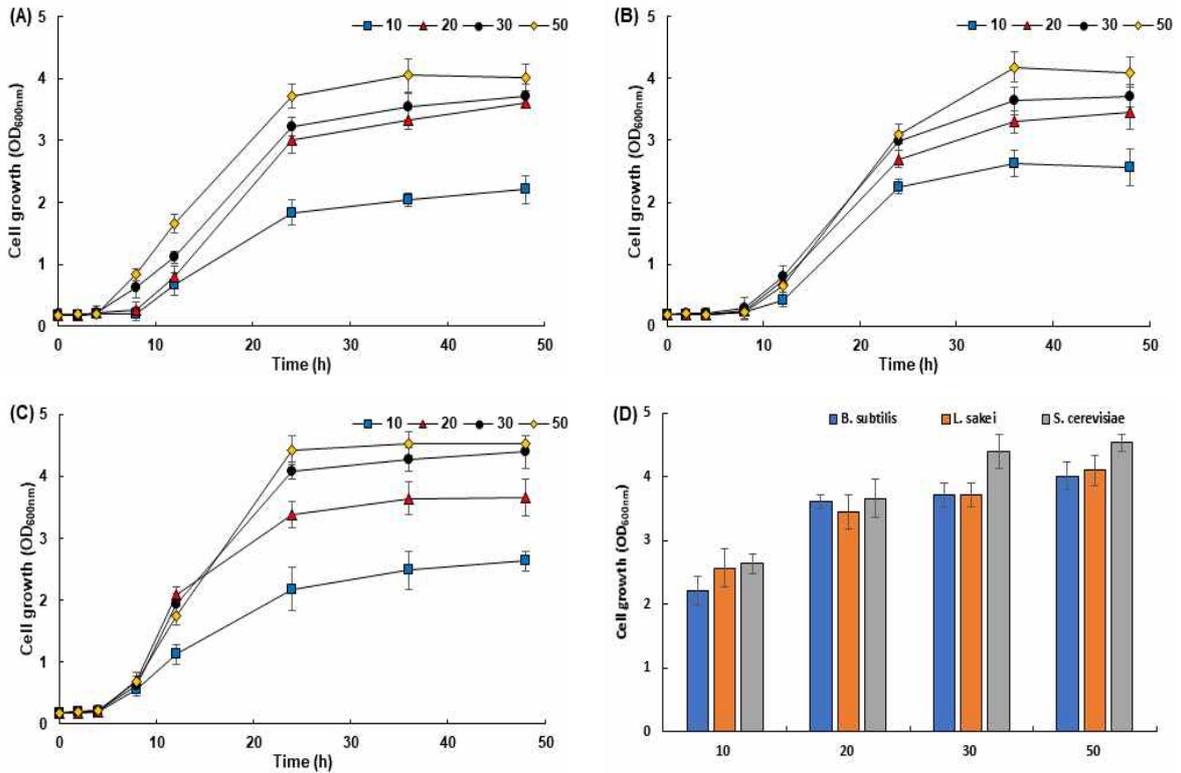


Fig. 3-73. C/N비 및 미생물 종류별 생육특성 [(A);C/N비별 *B. subtilis*의 생육, (B);C/N비 *L. sakei*의 생육, (C);C/N비 *S. cerevisiae*의 생육, (D);C/N비별 미생물 3종의 생육].

(나) 질소/인 제어율 조절 기술 확립

본 연구는 퇴비화시 미생물이 분뇨 내의 N/P비 환경에서도 잘 생육하는지 확인하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일미생물을 사용하였으며, 배지의 N/P비를 0.15, 1, 2.5, 5, 10으로 조절하였다. N/P비에 따른 미생물 생육은 모든 미생물이 Fig. 3-74~75와 같이 0.5~10에서 모두 잘 생육하였다. 일반적으로 가축분뇨의 N:P비율은 2:1~6:1의 비를 보이는데, 본 연구에 사용된 분뇨의 N/P비는 2.5로 3종의 미생물 모두 분뇨 내에서도 잘 성장할 것으로 판단된다. N/P는 질소계 화합물 몰농도의 합과 인산염인의 몰농도와의 비를 나타낸 것으로 N/P비가 16보다 크면 질소계 무기영양염류가 인계 무기영양염보다 풍부하므로 인이 미생물의 성장제한 인자가 되며 반대로 16보다 작으면 질소가 성장제한인자가 되는 것으로 알려져 있다.

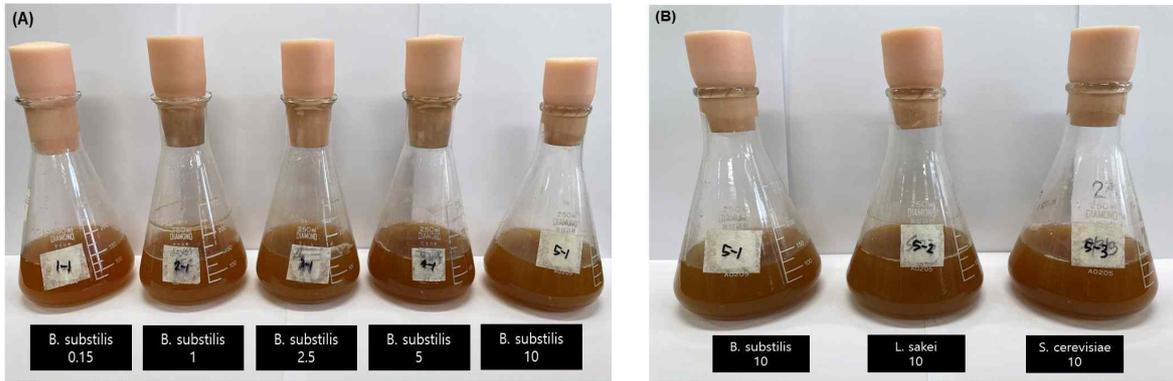


Fig. 3-74. N/P 및 미생물 종류별 생육전경 [(A);N/P비별, (B);미생물 종류별].

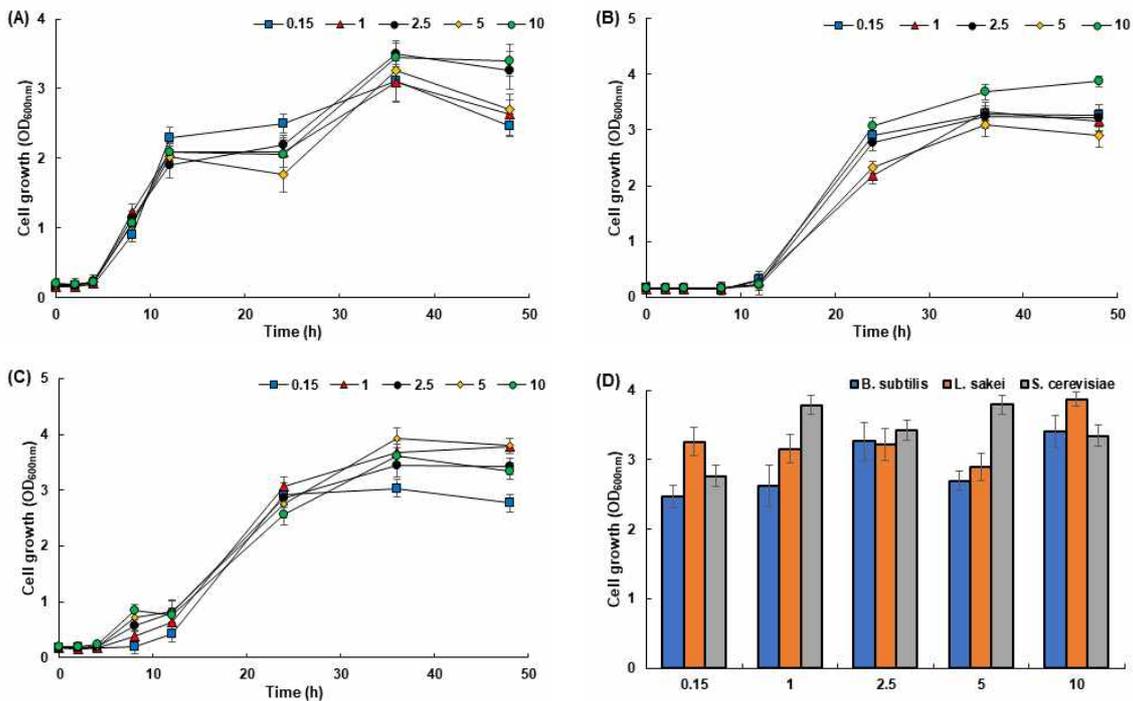


Fig. 3-75. N/P비 및 미생물 종류별 생육특성 [(A);N/P비별 *B. subtilis*의 생육, (B);N/P비 *L. sakei*의 생육, (C);N/P비 *S. cerevisiae*의 생육, (D);N/P비별 미생물 3종의 생육].

(다) 탄소/질소 제어공정의 운전기술 최종확립

상기 (가)항의 연구 결과에서 언급된 것과 같이 미생물의 생육 및 퇴비화에 있어 C/N ratio는 중요한 인자로 적용된다. 특히 미생물의 생육에 유기물과 질소는 탄소원과 영양원으로 활용되어지기 때문에 미생물의 생육에 매우 중요하다. 일반적인 깔짚 소재로 활용되어지는 피트모스, 톱밥, 왕겨 및 코코피트의 경우 질소함량은 상대적으로 낮으나 탄소함량이 매우 높아 높은 C/N을 나타낸다. 반면에 가축분 내에는 다량의 질소가 포함되어 있기 때문에 질소원으로 적용될 수 있다. 이에 본 연구결과에서 깔짚 소재와 가축분뇨의 혼합비율을 조절하면 미생물의 생육에 적합한 C/N비를 제어할 수 있다. 하지만 실제 축사환경에서 미생물의 생육에 효과적인 C/N를 구축하기 위해서 본 연구에서 개발된 깔짚 소재와 가축분뇨의 성상 및 투입량을 고려한 설계인자가 요구되어진다. 그래서 본 연구결과는 소형 pilot 장치에서 시행되기 보다는 실제 축사환경에 적합한 조건을 제시하는 것이 바람직할 것으로 판단되어 1차년도 연구 결과 수행내용을 2차년에 현장에 적용하여 탄소/질소 제어공정의 운전 기술을 최종적으로 확립할 예정이다.

(라) 개발된 공정의 운전비용 도출

주관기관에서 확립된 바이오차 혼합깔짚소재와 본 연구기관에서 확립된 최적 미생물제를 활용하여 축사바닥 바이오차 혼합깔짚을 제조하기 위한 공정의 운영비용 결과는 Table 3-56에서 보는 것과 같다. 축사바닥 바이오차 혼합깔짚 1 ton 제조하기 위한 운전비용은 총 15만정도로 산출되었으나, 대량생산체계를 갖추면 경제성을 더욱 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 원료를 사용하여 혼합미생물제를 제조한 후 깔짚 소재로 사용한다면, 경제성이 높을 것으로 판단된다. 현재 피트모스 및 코코피트의 경우 대부분 수입에 의해 공급되고 있는 실정으로 이들 소재를 대체할 수 있는 새로운 소재개발에 관한 연구가 꾸준히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 3-56. 혼합미생물제 1 ton 제조 기준 운전비용 도출

	원/kg	사용 kg	운전비용(원)
미강	260	70	23,800
밀기울	270	70	18,900
피트모스	60	520	31,200
바이오차	275	170	42,500
코코피트	150	170	25,500
미생물 제조배지		약 5000원	5000
전기사용요금		약 7000원	7000
	합계		153,900

(마) 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 배양공정의 연계 운전방법 확립

대량배양 공정을 통해서 제조된 미생물제를 주관연구기관에서 개발한 최적 축사바닥 깔짚소재 (피트모스, 코코피트 및 바이오차를 6:2:2)에 첨가하여 배합기에서 균질하게 배합한 후 고효율 및 단기숙성 축사바닥 깔짚 소재를 제조할 수 있다 (Fig. 3-76).



Fig. 3-76. 축사바닥 깔짚과 혼합미생물 배양공정의 연계 운전방법 확립.

다) 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 및 원료 다양화 방안 연구

(1) 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 조사

(가) 한우

축사바닥 깔짚 소재의 운영실태 조사는 경북, 전남, 충남, 전북, 경남 및 경기 6개 도의 농가를 방문하여 수집하였으며, 그 결과는 Table 3-57에서 보는 것과 같다. 조사된 6개도 중 전북이 한우 농가의 규모가 39두 (평균 사육두수)로 가장 높았으나 대체적으로 50두 미만의 영세한 축산농가가 대부분이었다.

Table 3-57. 도별 한우의 평균 사육 두수

경북	전남	충남	전북	경남	경기
17두	26두	21두	39두	18두	15두

각 도별 한우 축사에 사용하는 깔짚 재료를 조사한 결과는 Table 3-58에서 보는 바와 같다. 대부분의 한우 축사 농가에서는 알뜰밥 볶, 여름 및 가을철까지 사용하고 겨울철에는 벼 수확 및 탈곡하여 발생된 왕겨를 일부 사용하였다 (Fig. 3-77). 특히, 왕겨 (가공왕겨 포함)의 경우, 최근 수급의 차질로 원활한 공급이 어렵고, 비용이 상대적으로 비싸져 일부 농가에서만 소량으로 이용되고 있었다.

Table 3-58. 도별 한우 축산농가에 사용하는 깔짚 소재

경북	전남	충남	전북	경남	경기
툽밥(여름철) 왕겨(겨울철)	알뜰밥	알뜰밥	알뜰밥	알뜰밥 왕겨(일부사용)	알뜰밥



Fig. 3-77. 왕겨 적용 한우 농가, 경북 상주시.

도별 축산농가에서 깔짚 소재인 툽밥의 적용은 축사바닥으로부터 5cm의 높이로 깔아서 사용하는 것으로 조사되었다 (Table 3-59). 경남 일부 농가에서 깔짚에 왕겨를 일부 섞어 적용하였지만, 부숙 시 수분관리에 어려움이 있어 송풍량 증가로 인한 추가 비용이 발생하고 있는 것으로 조사되었다.

Table 3-59. 축사 내 깔짚 소재인 톱밥의 적용

경북	전남	충남	전북	경남	경기
톱밥 5cm	톱밥 5cm	톱밥 5cm	톱밥 5cm	톱밥 5cm+ 일부왕겨사용	톱밥 5cm

6개도에 소재한 한우 축산농가에서 깔짚 소재인 왕겨 및 톱밥의 교체 주기 및 비용은 Table 3-60에 나타내었다. 각 농가별 교체 주기는 평균 약 40일 가량으로, 이는 각 농가 퇴비사 내의 부숙도에 따라 약 3~5일가량의 차이는 있었다. 또한 깔짚의 비용은 110,000원~340,000원 범위였으며, 경기도에서 깔짚 소재의 공급에 소요되는 비용이 가장 높았다.

Table 3-60. 깔짚 소재의 교체 주기 및 소요되는 비용

	경북	전남	충남	전북	경남	경기
비용	110,000원	161,000원	181,000원	205,000원	109,000원	340,000원
교체주기	30~40일	40일 전후	약 45일	약 30~35일	30~40일	40~50일

특히 우분뇨의 경우 90% 이상의 한우 농가가 퇴비사에 분뇨를 저장 및 부숙을 거쳐 자가 처리하거나 마을 및 농협 공동퇴비장에서 분뇨를 자원화하고 있는 것으로 조사되었다.



Fig. 3-78. 공동퇴비장 (경북 성주군 벽진농협).

본 연구진이 4개월간 6개도의 한우 사육 농가에 사용되는 깔짚을 조사한 결과 기존 깔짚으로 사용되는 톱밥과 왕겨의 부숙 시 입도, 수분함량의 불균형으로 호기성 조건을 맞추기 위한 가압 송풍량의 조절에 어려움이 있으며, 톱밥 일부가 수분량이 높은 것이 있어, 부숙 시 추가 작업(건조 등)이 이루어지거나 깔짚의 교체 주기가 짧아져 비용이 상승된다는 문제점이 도출되었다. 또한 최근 기후변화 등 계절적 변화 (여름철 강우기간 장기화)로 인해 악취나 해충 등의 문제가 발생하고, 또한 퇴비의 부숙 기간도 길어지게 되는 것으로 조사되었다.

특히, 한우 사육 농가의 농장주는 부숙의 영향을 미치는 인자인 톱밥의 입도와 수분함량이 일정하고, 악취제거 등의 효과가 있고, 깔짚 소재의 수급이 안정적이라는 조건으로 대부분의 농가가 기존의 사용하고 있는 깔짚 소재를, 본 연구가 목표로 하는 깔짚 소재로 교체 시 효과가 있다면 교체할 의사가 있는 것으로 조사되었다.

(나) 육계

육계 사육농가의 축사바닥 깔짚 소재 운영실태 조사는 경북, 전북, 전남, 충남, 경기, 경북 및 충북 6개도의 농가를 방문하여 수집하였으며, 그 결과는 Table 3-61에서 보는 것과 같다. 조사된 6개도 중 경북의 육계 농가의 규모가 120,000수 (평균 사육수)로 가장 높았으나 대체적으로 30,000수 이상의 육계를 사육하고 있었다.

Table 3-61. 전북, 전남, 충남, 경기, 경북 및 충북 육계 사육 농가의 마리수

전북	전남	충남	경기	경북	충북
100,000수	50,000수	80,000수	55,000수	120,000수	45,000수

각 농가별 교체 주기가 차이가 있기보단 조류독감(AI) 감염 방지를 위해 육계출하 후 깔짚을 교체하고 있었으며, 깔짚 소재 또한 대부분 왕겨를 사용하고 있고, 깔짚 교체 후 감염의 위험으로 외주처리를 하고 있었다.

Table 3-62. 조사된 육계사육농의 깔짚 교체 주기 및 비용

조사항목	경북	전남	충남	전북	경남	경기
비용	1,500,000원	800,000원	1,100,000원	850,000원	1,850,000원	700,000원
교체주기	출하일령(평균 42~50일), 출하 후 교체					
깔짚소재	왕겨 및 톱밥(일부)					

본 연구진이 4개월간 6개도의 육계 사육 농가에 사용되는 깔짚을 조사한 결과 깔짚 소재인 왕겨의 수급이 원활하지 않은데다, 가격의 불안정한 상황이 근래 발생하였고, 최근 조류독감(AI) 감염위험으로 인해 매 육계출하시 깔짚을 교체하는데 비용 발생이 소요되는 문제점이 있었다. 특히 최근 조류독감(AI) 감염으로 인해 살처분 되는 육계가 상당히 많기에, 본 연구로 통해 만들어지는 새로운 깔짚 소재를 사용 시 내병원성이 강해진다면 기존의 깔짚 소재보다 약간의 비용상승을 감내하더라도 안정정인 소재를 농가들은 원하고 있다.



Fig. 3-79. 왕겨 사용 육계농가 (경북 칠곡군).

(2) 축사바닥 깔짚 소재 문제점 및 개선방안 도출

본 연구진이 4개월간 한우 및 양계 농가를 시찰하여 기존 깔짚 소재의 문제점 및 개선방안을 확립하였으며, 그 결과는 Table 3-63에서 보는 것과 같다.

Table 3-63. 기존 깔짚 소재의 문제점 및 개선방안

문제점	개선방안
1 깔짚의 부숙 시 입도, 수분함량의 불균형으로 호기성 조건을 맞추기 위한 가압송풍량의 조절에 어려움이 있음	깔짚 원재료의 물리적 특성의 일관성을 유지하도록 함
2 톱밥 일부가 수분량이 높은 것이 있어, 부숙 시 추가작업(건조 등)이 이루어 지거나 깔짚의 교체 주기가 짧아져 비용상승이 되었음	제품 생산 및 가공과정 중 수분함량을 일정 비율로 조절함
3 최근 계절적 변화(여름철 강우기간 장기화)로 인해 악취발생이나 해충발생 등의 문제가 이슈가 되고, 또한 퇴비의 부숙 기간도 길어졌음	부숙도 개선효과가 있는 깔짚 소재의 개발 및 적용이 필요함
4 깔짚소재인 왕겨의 수급이 원활하지 않는데다, 가격의 불안정한 상황이 근래 발생함	수급이나 가격의 불안정이 낮은 원재료를 새로운 깔짚 소재 원재료로 선정하도록 함
5 최근 조류독감(AI) 감염위험으로 인해 매 육계 출하시 깔짚을 교체하는데 비용발생이 큼	새로운 깔짚 소재 개발시 내병원성 여부에 대한 연구를 함께 수행하도록 함

(3) 축사바닥 깔짚 소재 원료 수급 방법 및 다양화 방안 연구

퇴비화 효율을 증진시키고 숙성기간이 짧은 깔짚소재는 주관기관에 의해 개발되었다. 개발된 깔짚소재는 피트모스:코코피트:BPP-BA를 6:2:2의 비로 혼합하고 미생물제로 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei* 및 *Sacchromyces cerevisiae*를 1:1:1의 비로 혼합하여 깔짚 부피대비 3%를 첨가하게 된다. 본 연구진은 개발된 깔짚 소재를 산업화 및 실용하기 위해 사용된 원료의 수급 방법 및 계획을 확립하였으며, 그 결과는 Table 3-64에서 보는 것과 같다.

본 연구에서 개발된 혼합 깔개에 사용되는 바이오차는 한국남동발전 전소발전소에서 생산하는 소재를 사용할 계획이며, 피트모스와 코코피트는 2022년도 원료수급상황과 향후 가격안정성을 고려한 제품으로 적용할 계획이다. 특히 본 실험에 사용된 미생물제제의 경우 흡사랑에서 개발한 제품으로 필요시 원하는 만큼의 미생물제가 공급될 수 있도록 생산설비를 제작 및 시공할 예정이다.

Table 3-64. 핵심 깔짚 재료의 수급량 및 수급가능 일정.

	원재료	수급량	수급가능일정		비고
1	바이오차	약 5,000m ³	22년도 2분기	11000원/40L	톤백 또는 50 L 포장
2	피트모스	10,000~15,000m ³	22년도 1,2분기	348,000원/5800L	5.8 m ³ 블록 포장
3	코코피트	10,000m ³	22년도 1,2분기	180,000원/1200L	
4	미생물	-	-	-	(즉시수급 가능)



Fig. 3-80. 코코피트 및 피트모스의 공급 형태.

본 깔짚 소재를 대량 생산하기 위해 사용되는 부형제 및 고품재비 조성에 필요한 소재들의 공급형태 및 가격은 Table 3-65에 나타내었다. 왕겨, 톱밥, 미강, 생균제 등 깔짚 소재 원료들은 다양한 제조업체 및 수입업체가 존재하고, 물류비 (국내운송)비중이 크고 지역마다 편차가 있어, 상기 가격표에는 물류비는 반영하지 않았다. 왕겨의 경우 국내 수급상황에 따라 가격 편차가 발생하고 있는 실정으로 가격이 비교적 저렴할 때 대량구매를 해놓는 것이 더 경제적 일 것이라 판단하였다. 톱밥은 20~21년도 코로나 상황과 최근 국제 물류비 상승으로 수입산 가격 변동폭이 큰 상황이기에, 본 연구 진행 시 깔짚 소재 대체품과 가격 비교 관찰이 필요할 것으로 예상되었다.

Table 3-65. 축사바닥 깔짚 제조를 위한 보조제들의 공급형태 및 가격

	원재료	공급형태	가격비교	비고
1	왕겨	포대(50L,100L) 벌크(톤백)	185~350원/kg	국내산
2	알톱밥	벌크(톤백)	190원/kg	수입산
3	톱밥	벌크(톤백)	185~195원/kg	수입산
4	미강	벌크(톤백) 약 500kg	260원/kg	국내산
5	생균제	50L 포대	20,000원/포	국내산

2) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발

가) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계를 위한 핵심기술 개발

(1) 계사 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립

(가) 계사 전용 깔짚 소재 최적 수분조절재 및 혼합비율 선정

① 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험

계사 전용 소재 개발을 위한 최적 수분조절재를 선정하기 위하여 1차년도 과제 수행 시에 사용하였던 왕겨, 톱밥, 피트모스, 코코피트 및 바이오차를 활용하여 계분에 대한 수분조절 능력을 조사하였다.

왕겨, 톱밥, 피트모스, 코코피트 및 바이오차 단일 소재 깔짚에 계분뇨를 매일 일정량 투입하며 수분함량을 분석한 결과는 Fig. 4-1에서 보는 바와 같다. 수분함량은 60일의 모니터링 기간 중 서서히 증가하였으며 모든 처리구에서 유사한 경향을 보였다. 모니터링 기간 중에 수분함량이 대체적으로 증가하였지만 유지되거나 감소하는 구간이 존재하였는데, 이는 외부 환경에 의해 깔짚의 수분이 증발하기 때문으로 판단된다. 수분함량은 초기 10.1~22.8%에서 계분뇨 투입 17일 후까지 급격하게 증가하여 50.3~55.6%가 되었으며, 이후 수분 함량은 급격하게 변화하지 않았다. 계분뇨 투입 60일 후의 최종 수분함량은 피트모스 (63.8%) > 코코피트 (61.9%) > 톱밥 (61.7%) > 왕겨 (61.6%) > 바이오차 (60.3%)로 바이오차가 수분함량이 가장 낮고 피트모스가 수분함량이 가장 높았으나 기존에 깔짚으로 사용하는 톱밥 및 왕겨와 큰 차이를 보이지 않았다. 피트모스의 최종 수분함량이 높게 나온 것은 피트모스 소재가 다른 소재에 비해 많은 수분을 함유하고 있기 때문으로 판단된다.

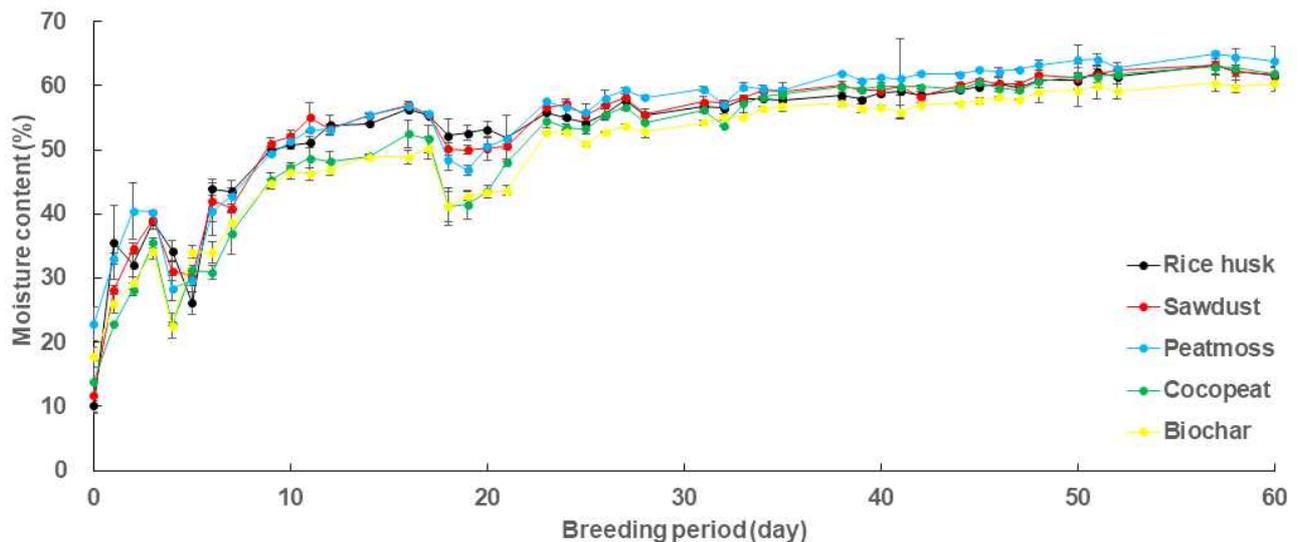


Fig. 4-1. 단일 소재 깔짚 적용 시 계분뇨 투입에 따른 수분함량 변화.

단일 소재 깔짚의 수분 조절 능력을 평가하기 위하여 계분뇨 투입에 따른 각 깔짚의 수분 함량 변화 결과를 이용하여 계분뇨 처리일에 따른 일차 수분흡수속도 방정식과 구간별 수분흡수속도를 조사한 결과는 Fig. 4-2 및 Table 4-1에 나타내었다.

왕겨 깔짚의 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 계분뇨가 투입된 후 13일까지를 stage 1, 계분뇨 투입 후 13일부터 60일까지를 stage 2로 두 구간으로 구분하였다. 왕겨를 깔짚으로 사용하였을 때, stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0424x-0.6766$ ($R^2=0.9180$)이었으며, stage 2의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0037x-0.2022$ ($R^2=0.8614$)으로 나타났다. stage 2는 stage 1에 비해 기울기가 완만하여 수분흡수속도가 감소한 것을 확인하였다. 또한 stage 2의 수분흡수속도 상수(-K)는 0.0037로 stage 1의 0.0424에 비해 11.5배 낮았으며, 왕겨 깔짚이

수분을 흡수하는 속도가 stage 2에서 크게 감소하였다.

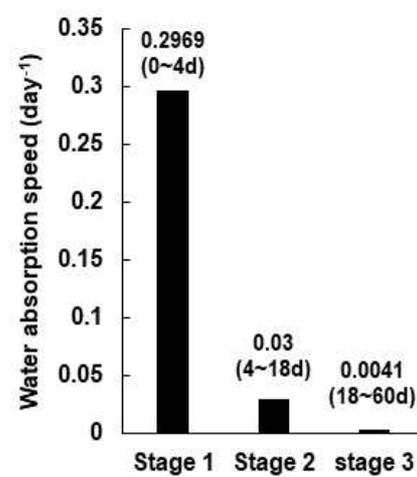
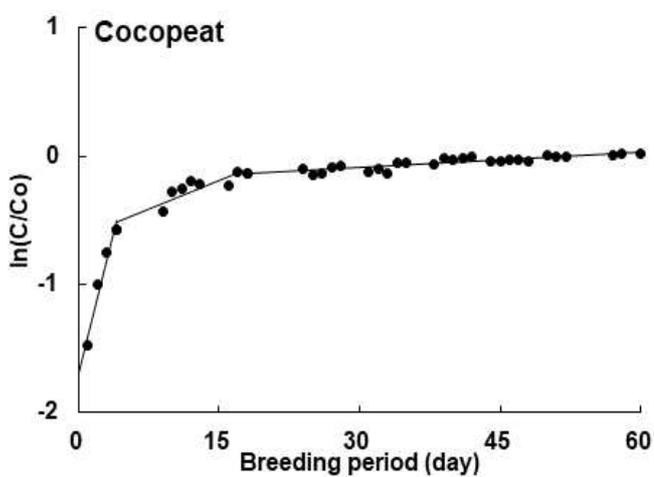
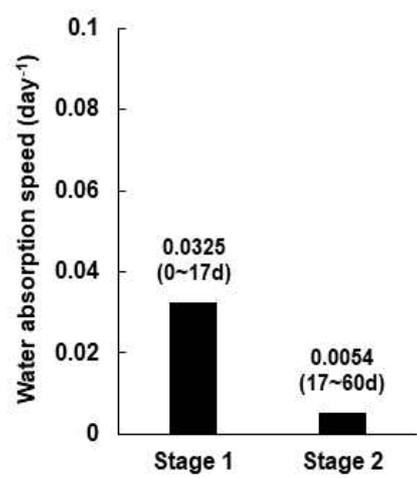
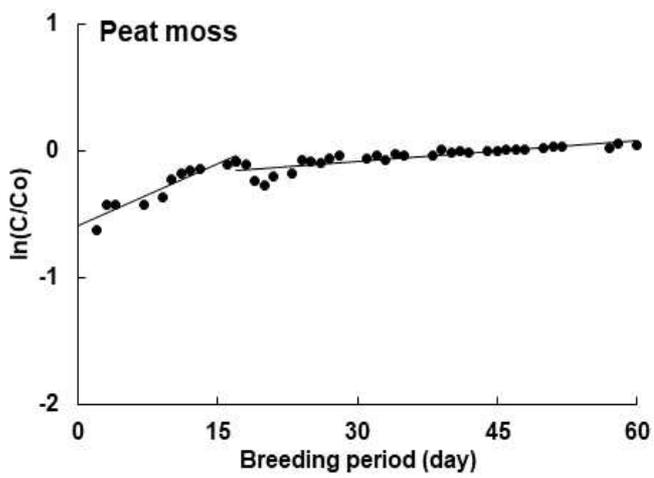
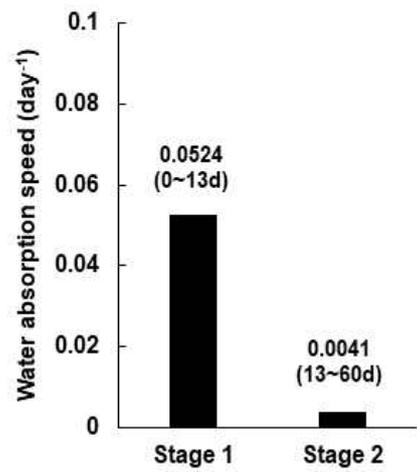
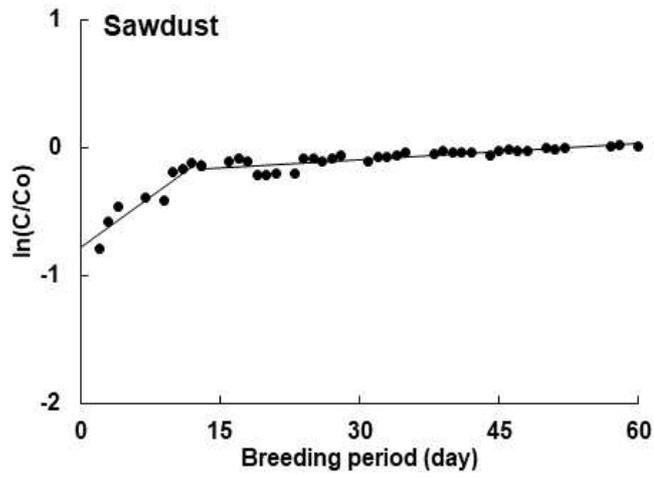
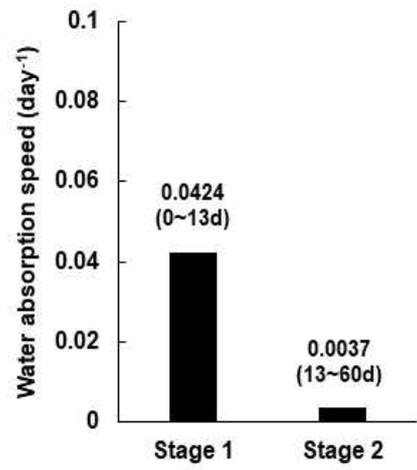
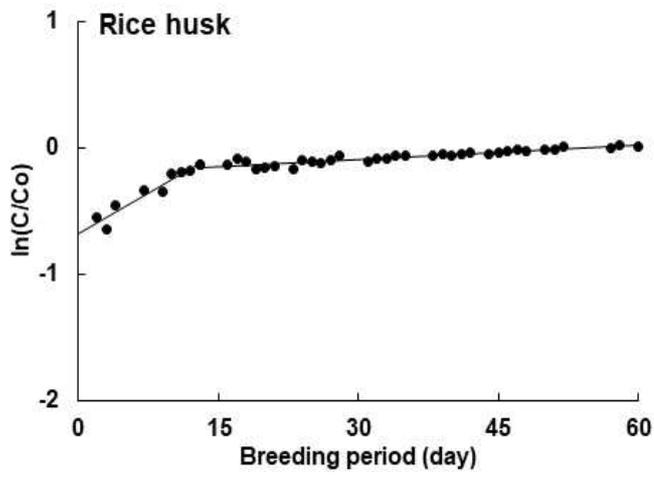
톱밥 깔짚의 경우, 왕겨 깔짚과 유사하게 계분뇨가 투입된 후 13일을 기반으로 stage 1 (0~13일)과 stage 2 (13~60일)로 구분할 수 있었다. 톱밥을 깔짚으로 사용하였을 때, stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0524x-0.7719$ ($R^2=0.8858$)이었으며, stage 2의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0041x-0.2112$ ($R^2=0.7149$)으로 나타났다. 왕겨 깔짚과 동일하게 톱밥 깔짚도 stage 2에서 기울기가 완만해졌으며, 수분흡수속도 상수 (-K)가 stage 1에서 0.0524이고 stage 2에서 0.0041로 나타나 stage 1에 비해 stage 2에서 12.7배 감소하여 톱밥 깔짚이 수분을 흡수하는 속도가 크게 감소하는 것을 확인하였다.

피트모스 깔짚의 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 계분뇨가 투입된 후 17일까지를 stage 1, 계분뇨 투입 후 17일부터 60일까지를 stage 2 두 구간으로 구분하였다. stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0325x-0.59366$ ($R^2=0.8851$)이었으며, stage 2의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0054x-0.2433$ ($R^2=0.7077$)으로 나타났다. 피트모스 깔짚은 수분흡수속도 상수(-K)가 stage 1에서 0.0325이고 stage 2에서 0.0054로 나타나 stage 1에 비해 stage 2에서 6.0배 감소하여 수분흡수속도가 감소하는 것을 확인하였다. 피트모스 깔짚은 톱밥 및 왕겨 깔짚에 비해 감소되는 속도는 작게 나타났는데, 이는 stage 1의 수분흡수속도가 두 깔짚에 비해 낮았기 때문이다.

코코피트 깔짚의 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 계분뇨가 투입된 후 4일까지를 stage 1, 계분뇨 투입 후 4일부터 8일까지를 stage 2, 계분뇨 투입 후 8일부터 60일까지를 stage 3로 세 구간으로 구분하였다. stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.2969x-1.6923$ ($R^2=0.9480$)이었으며, stage 2의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.03x-0.6366$ ($R^2=0.8289$), stage 3의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0041x-0.2142$ ($R^2=0.7987$)으로 나타났다. 코코피트 깔짚은 수분흡수속도 상수 (-K)가 stage 1에서 0.2969이고 stage 2에서 0.0300, stage 3에서 0.0041로 나타났다. 코코피트 깔짚은 깔짚 투입 후 초기 구간인 stage 1에서 매우 빠른 속도로 수분이 흡수되었으며 stage 2를 거쳐 stage 3까지 수분흡수속도가 크게 감소하였다. 코코피트 깔짚은 왕겨, 톱밥 및 피트모스 깔짚과 다르게 초기 수분조절능력이 매우 낮아 깔짚으로 사용하기에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

바이오차 깔짚의 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 계분뇨가 투입된 후 13일까지를 stage 1, 계분뇨 투입 후 13일부터 60일까지를 stage 2로 두 구간으로 구분하였다. stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0522x-0.9036$ ($R^2=0.9287$)이었으며, stage 2의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0067x-0.3756$ ($R^2=0.7209$)로 나타나 다른 깔짚과 유사하게 구간이 바뀌며 기울기가 완만해져 수분흡수속도가 크게 감소하였다.

위 결과를 미루어 보아 코코피트는 초기 수분조절능력이 다른 깔짚에 비해 매우 떨어져 깔짚 소재로 사용하기에 어려움이 있을 것으로 판단되었다. 바이오차는 계분뇨 투입 후 13일까지 stage 1 구간이 유지되어 기존에 깔짚으로 사용하던 왕겨 및 톱밥과 유사한 수분조절능력을 보유하고 있는 것으로 판단되었다. 피트모스는 stage 1구간이 계분뇨 투입 후 17일까지 유지되고, 피트모스 깔짚의 stage 1의 수분흡수속도가 왕겨 및 톱밥의 수분흡수속도인 0.0424 및 0.0524보다 낮은 0.0325로 기존에 깔짚으로 사용하던 왕겨 및 톱밥에 비해 매우 뛰어난 수분조절능력을 보유하고 있다고 판단되었다. 따라서 계사 전용 깔짚의 소재로 수분조절능력이 뛰어난 피트모스를 주소재로 사용하고, 깔짚의 악취 저감 능력 증진 및 부숙화 증진 효과를 극대화하기 위하여 보조재로 바이오차를 첨가하여 사용하는 것이 합리적이라 판단되었다.



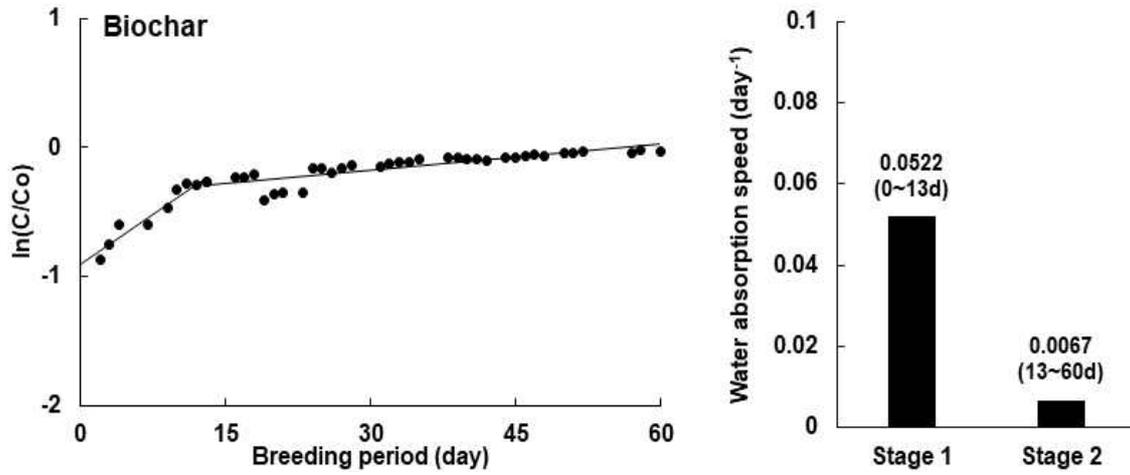


Fig. 4-2. 단일 소재 깔짚 적용 시 계분뇨 투입에 따른 수분흡수속도.

Table 4-1. 계분뇨 처리에 따른 단일 소재 깔짚의 First-order reaction equation 및 수분흡수속도

Litter	First-order reaction equation (R^2)		Water absorption speed
	$\ln(C/C_0) = -Kt$		($-K$, day^{-1})
Rice husk	Stage 1	$y = 0.0424x - 0.6766 (R^2 = 0.9180)$	0.0424
	Stage 2	$y = 0.0037x - 0.2022 (R^2 = 0.8614)$	0.0037
Sawdust	Stage 1	$y = 0.0524x - 0.7719 (R^2 = 0.8858)$	0.0524
	Stage 2	$y = 0.0041x - 0.2112 (R^2 = 0.7149)$	0.0041
Peat moss	Stage 1	$y = 0.0325x - 0.59366 (R^2 = 0.8851)$	0.0325
	Stage 2	$y = 0.0054x - 0.2433 (R^2 = 0.7077)$	0.0054
Cocopeat	Stage 1	$y = 0.2969x - 1.6923 (R^2 = 0.9480)$	0.2969
	Stage 2	$y = 0.03x - 0.6366 (R^2 = 0.8289)$	0.0300
	Stage 3	$y = 0.0041x - 0.2142 (R^2 = 0.7987)$	0.0041
Biochar	Stage 1	$y = 0.0522x - 0.9036 (R^2 = 0.9287)$	0.0522
	Stage 2	$y = 0.0067x - 0.3756 (R^2 = 0.7209)$	0.0067

② 혼합 깔짚의 수분흡수속도 및 수분 흡수율 시험

상기 (가)-① 항의 결론으로 도출된 피트모스 및 바이오차 혼합 깔짚의 혼합 비율을 선정하기 위하여 피트모스와 바이오차를 각각 8:2, 7:3 및 6:4의 부피비로 혼합하여 계분뇨에 대한 수분조절 능력을 조사하였다.

피트모스 및 바이오차를 8:2, 7:3 및 6:4로 혼합된 깔짚을 각각 PM:BC(8:2), PM:BC(7:3) 및 PM:BC(6:4)로 표기하였다. 혼합 깔짚의 수분조절 능력을 확인하기 위한 대조구로 왕겨 및 톱밥을 사용하였으며, 비율별 혼합 깔짚과 왕겨 및 톱밥 깔짚에 계분뇨를 매일 일정량 투입하며 수분함량을 분석한 결과는 Fig. 4-3에서 보는 바와 같다. 수분함량은 60일의 모니터링 기간 중 서서히 증가하였으며 모든 처리구에서 유사한 경향을 보였다. 모니터링 기간 중에 수분함량이 대체적으로 증가하였지만 유지되거나 감소하는 구간이 존재하였는데, 이는 외부 환경에 의해 깔짚의 수분이 증발하기 때문으로 판단된다. 왕겨 및 톱밥의 수분함량은 초기 10.1~11.7%에서 계분뇨 투입 17일 후까지 급격하게 증가하여 55.3~55.6%가 되었으며, 이후 수분함량은 급격하게 증가하지 않았다. 혼합 깔짚의 수분함량은 초기 23.4~24.5%에서 계분뇨 투입 17일 후까지 급격하게 증가하여 52.3~53.8%가 되었으며, 톱밥 및 왕겨와 유사하게 이후 수분함량은 급격하게 증가하지 않았다. 계분뇨 투입 17일 후에 수분함량은 왕겨 및 톱밥보다 혼합 깔짚에서 약 2% 정도 낮게 나타나 혼합 깔짚의 수분조절 능력이 더 뛰어난 것으로 확인되었다. 계분뇨 투입 60일 후의 최종 수분함량은 PM:BC(6:4) (61.7%) > 톱밥 (61.7%) > 왕겨 (61.6%) > PM:BC(8:2) (61.5%) > PM:BC(7:3) (61.0%)로 PM:BC(7:3)이 수분함량이 가장 낮고 PM:BC(6:4)가 수분함량이 가장 높았으나 기존에 깔짚으로 사용하는 톱밥 및 왕겨와 큰 차이를 보이지 않았다. 혼합 깔짚의 초기 수분함량이 왕겨 및 톱밥 보다 높은 것을 고려하면 혼합 깔짚이 왕겨 및 톱밥에 비해 수분조절 능력이 더 뛰어난 것으로 판단된다.

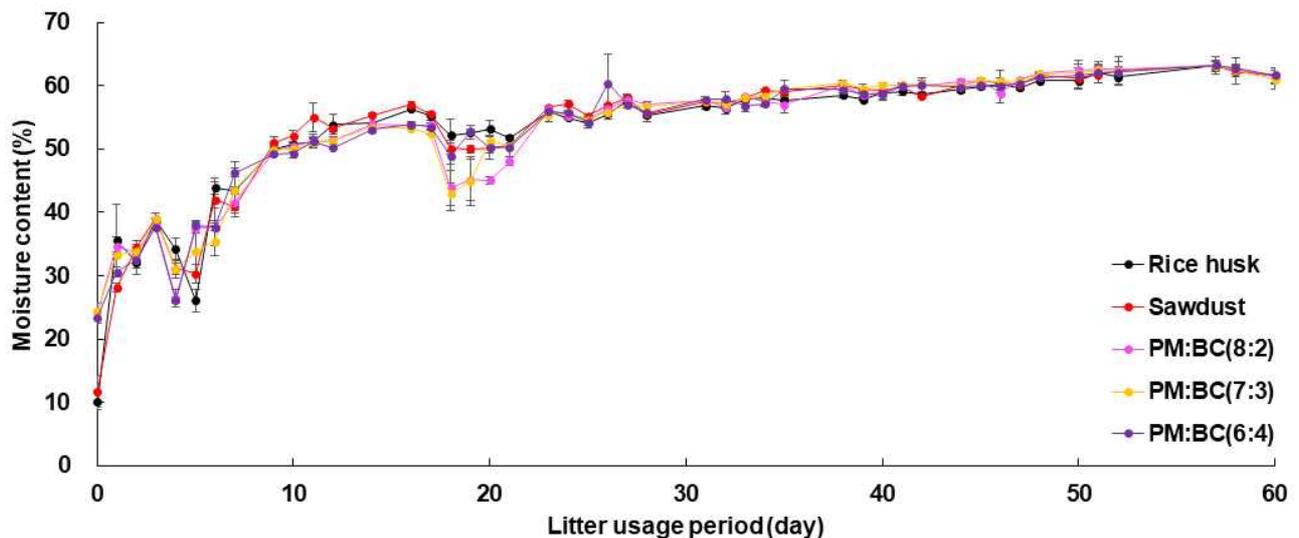


Fig. 4-3. 피트모스 및 바이오차 단일 소재 깔짚과 피트모스-바이오차 혼합 깔짚 적용 시 계분뇨 투입에 따른 수분함량 변화.

혼합 깔짚의 수분조절 능력을 평가하기 위하여 계분뇨 투입에 따른 각 깔짚의 수분함량 변화 결과를 이용하여 계분뇨 처리일에 따른 일차 수분흡수속도 방정식과 구간별 수분흡수속도를 조사한 결과는 Fig. 4-4 및 Table 4-2에 나타내었다.

PM:BC(8:2) 깔짚의 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 계분뇨가 투입된 후 13일까지를 stage 1, 계분뇨 투입 후 13일부터 60일까지를 stage 2로 두 구간으로 구분하였다. PM:BC(8:2) 깔짚을 사용하였을 때, stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0556x-0.841$ ($R^2=0.8902$)이었으며, stage 2의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0040x-0.2038$ ($R^2=0.9225$)으로 나타났다. stage 2는 stage 1에 비해 기울기가 완만하여 수분흡수속도가 감소한 것을 확인하였다. Stage 2의 수분흡수속도 상수 (-K)는 0.0040으로 stage 1의 0.0556에 비해 13.9배 낮았으며, PM:BC(8:2) 깔짚이 수분을 흡수하는 속도가 stage 2에서 크게 감소하였다.

PM:BC(7:3) 깔짚의 경우, 계분뇨가 투입된 후 11일을 기반으로 stage 1 (0~11일)과 stage 2 (11~60일)로 구분할 수 있었다. PM:BC(7:3)을 깔짚으로 사용하였을 때, stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0615x-0.8159$ ($R^2=0.8446$)이었으며, stage 2의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0046x-0.2251$ ($R^2=0.8590$)으로 나타났다. PM:BC(7:3) 깔짚도 다른 깔짚들과 유사하게 stage 2에서 기울기가 완만해졌으며, 수분흡수속도 상수 (-K)가 stage 1에서 0.0615이고 stage 2에서 0.0046으로 나타나 stage 1에 비해 stage 2에서 13.4배 감소하여 PM:BC(7:3) 깔짚이 수분을 흡수하는 속도가 크게 감소하는 것을 확인하였다.

PM:BC(6:4) 깔짚의 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 계분뇨가 투입된 후 10일까지를 stage 1, 계분뇨 투입 후 10일부터 60일까지를 stage 2 두 구간으로 구분하였다. stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0765x-0.9588$ ($R^2=0.8832$)이었으며, stage 2의 수분흡수속도 방정식은 $y=0.0049x-0.2472$ ($R^2=0.9099$)로 나타났다. PM:BC(6:4) 깔짚은 수분흡수속도 상수 (-K)가 stage 1에서 0.0765이고 stage 2에서 0.0049로 나타나 stage 1에 비해 stage 2에서 15.6배 감소하여 수분흡수속도가 감소하는 것을 확인하였다.

위 결과들을 종합하였을 때, PM:BC(8:2) 깔짚은 왕겨 및 톱밥과 유사하게 계분뇨 투입 후 13일을 기반으로 구간을 구분할 수 있었다. PM:BC(8:2), 왕겨 및 톱밥의 stage 1의 수분흡수속도는 각각 0.0556, 0.0424 및 0.0524로 왕겨에 비해 PM:BC(8:2) 깔짚의 계분뇨에 대한 초기 수분 조절 능력은 다소 떨어지지만 톱밥과 유사하였다. PM:BC(8:2), 왕겨 및 톱밥의 stage 2의 수분흡수속도는 각각 0.0040, 0.0037 및 0.0041로 계분뇨 투입 13일 이후의 PM:BC(8:2), 왕겨 및 톱밥의 수분 조절 능력은 유사하였다. 반면에 PM:BC(7:3) 및 PM:BC(6:4)의 stage 1이 각각 계분뇨 투입 후 11일 및 10일이며, PM:BC(7:3) 및 PM:BC(6:4)의 stage 1에서의 수분흡수속도는 각각 0.0615 및 0.0765로 초기 수분 조절 능력이 PM:BC(8:2)에 비교하여 크게 떨어지는 것을 확인하였다. PM:BC(7:3) 및 PM:BC(6:4)의 Stage 2에서의 수분흡수속도는 각각 0.0046 및 0.0049로 바이오차의 함량이 증가할수록 수분 조절 능력이 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 피트모스와 바이오차를 8:2의 부피비로 혼합한 PM:BC(8:2) 깔짚이 계사 전용으로 사용하기 위한 혼합 깔짚의 최적 비율이라고 판단하였다.

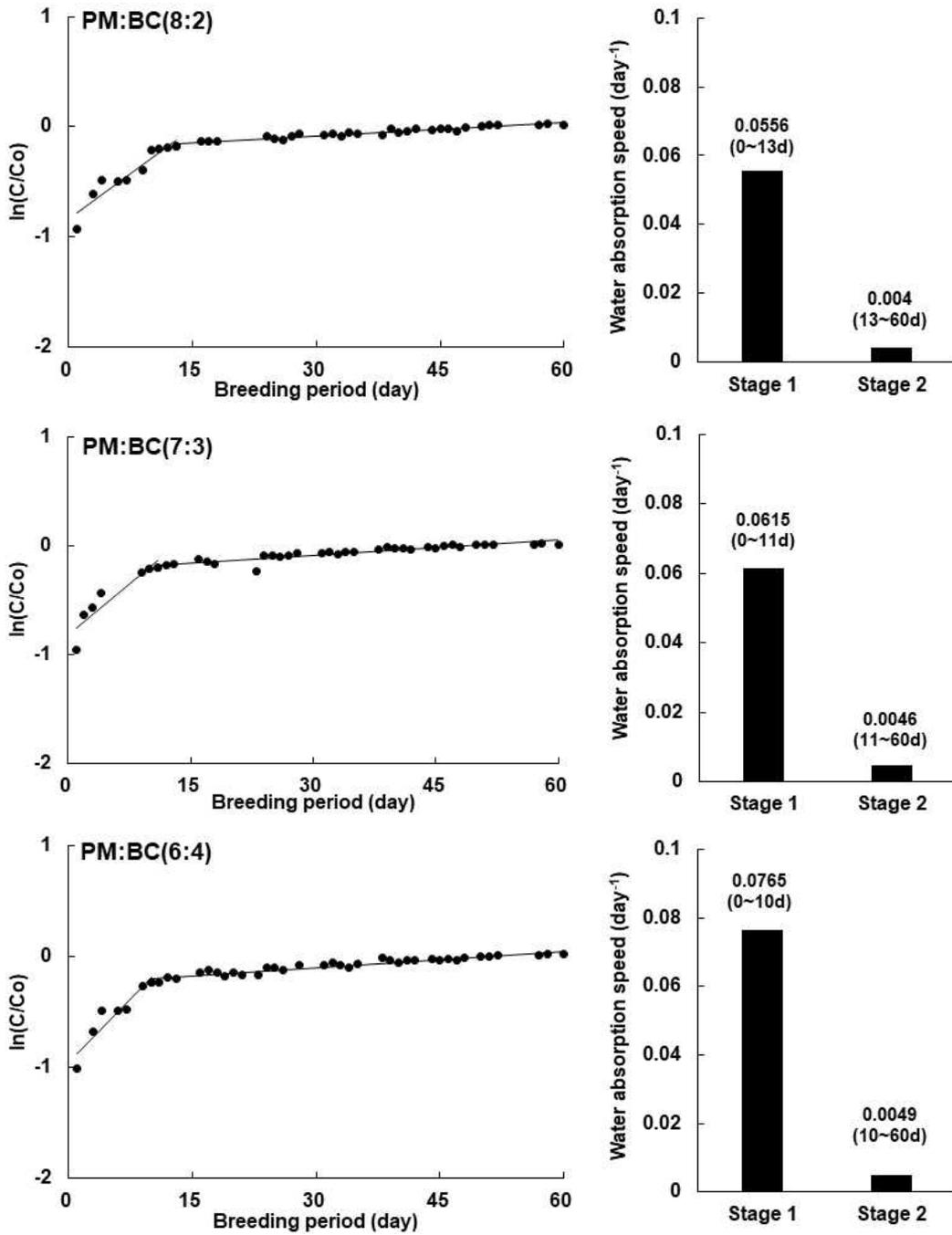


Fig. 4-4. 혼합 깔짚 적용 시 계분뇨 투입에 따른 수분흡수속도.

Table 4-2. 계분뇨 처리에 따른 혼합 깔짚의 First-order reaction equation 및 수분흡수속도

Litter	First-order reaction equation (R^2)		Water absorption speed ($-K, \text{day}^{-1}$)
		$\ln(C/C_0)=-Kt$	
8:2	Stage 1	$y=0.0556x-0.841(R^2=0.8902)$	0.0556
	Stage 2	$y=0.004x-0.2038(R^2=0.9225)$	0.004
7:3	Stage 1	$y=0.0615x-0.8159(R^2=0.8446)$	0.0615
	Stage 2	$y=0.0046x-0.2251(R^2=0.859)$	0.0046
6:4	Stage 1	$y=0.0765x-0.9588(R^2=0.8832)$	0.0765
	Stage 2	$y=0.0049x-0.2472(R^2=0.9099)$	0.0049

단일 소재 깔짚 및 혼합 깔짚의 수분 흡수율을 조사한 결과는 Table 4-3 및 Table 4-4에 나타내었다. 본 시험결과는 각 깔짚에 육계 1마리가 배출하는 계분뇨 7일분에 해당하는 수분을 증류수로 대체하여 투입한 후 30분 후 배출되는 수분의 양을 측정하여 분석한 결과로, 수분 투입량이 감소하거나 증가하면 수분 흡수율에 변화가 있을 수 있어 특정 조건에 대한 단순 깔짚 간의 비교자료로만 활용될 수 있다.

단일 소재 깔짚의 수분 흡수율은 바이오차 (60.9%) > 코코피트 (57.4%) > 피트모스 (40.6%) > 톱밥 (16.9%) > 왕겨 (16.2%)로 바이오차의 수분 흡수율이 가장 높았으며, 코코피트는 바이오차와 수분 흡수율이 크게 차이하지 않았다. 피트모스의 수분 흡수율은 바이오차 및 코코피트보다 떨어졌지만, 톱밥 및 왕겨와 비교하였을 때 수분 흡수율이 24% 정도 차이나 높은 수분 흡수율을 보유하고 있는 것을 확인하였다.

혼합 깔짚의 수분 흡수율은 PM:BC(6:4) (47.5%) > PM:BC(7:3) (47.3%) > PM:BC(8:2) (44.4%)로 혼합 깔짚의 수분 흡수율이 피트모스 단일 소재보다 높고 바이오차보다 낮았으며 혼합 깔짚의 비율에 따른 수분 흡수율 차이는 크지 않았다.

위 수분 흡수율 조사 결과를 종합하여 보았을 때, 기존에 깔짚으로 사용하던 톱밥 및 왕겨는 수분 흡수율이 매우 낮아 계분뇨가 배출되었을 때 계분뇨에 포함되어있는 수분을 모두 흡수하지 못하고 외부로 유출수를 발생시킬 위험이 있으며, 이에 따라 외부 수질 및 토양에 악영향을 미칠 가능성이 있을 것으로 판단된다. 반면에 피트모스 및 바이오차를 혼합한 혼합 깔짚은 수분 흡수 능력이 왕겨 및 톱밥보다 뛰어나기 때문에 계분뇨에 포함되어있는 수분을 흡수하여 외부로 유출수를 발생시킬 가능성이 감소할 것으로 판단된다.

Table 4-3. 단일 소재 깔짚의 수분 흡수율

Litter	Volume of water		Water absorption rate
	Input (mL)	Output (mL)	%
Rice husk	674.23	564.73±9	16.2±1.3
Sawdust	674.23	560.07±4.4	16.9±0.6
Peat moss	674.23	400.40±5	40.6±0.7
Cocopeat	674.23	287.20±2.7	57.4±3
Biochar	674.23	263.78±6.6	60.9±2.3

Table 4-4. 혼합 깔짚의 수분 흡수율

Litter	Volume of water		Water absorption rate
	Input (mL)	Output (mL)	(%)
PM:BC(8:2)	674.23	375.23±10.2	44.4±1.5
PM:BC(7:3)	674.23	355.43±6.3	47.3±0.9
PM:BC(6:4)	674.23	354.25±10.8	47.5±1.6

(나) 최적화된 깔짚 소재의 계분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립

상기 (가)항의 Fig. 4-1 (가-①) 및 Fig. 4-3 (가-②)의 결과를 미루어 볼 때, 수분흡수속도 상수가 급격하게 감소하는 것은 수분을 흡수하는 능력이 크게 떨어지는 것을 의미하여 수분흡수속도 상수가 급변하는 부분을 계사의 깔짚 적정 교체 시기라 판단하였다. 기존에 깔짚으로 사용하던 왕겨 및 톱밥은 13일을 기점으로 수분흡수속도 상수가 급변하기 때문에 13일을 깔짚 사용 최대 일수로 판단되었다. 최적 혼합 깔짚인 PM:BC(8:2)는 왕겨 및 톱밥과 유사하게 13일을 기점으로 수분흡수속도 상수가 급변하여 깔짚 사용 최대 일수는 왕겨 및 톱밥과 유사한 것으로 판단되었다. 본 시험에서의 결과는 일반적으로 알려진 계사의 적정 깔짚 교체 주기와 상이하여 실제 축사에서 수분조절 능력을 조사할 필요가 있을 것으로 판단된다.

(다) 계사 전용 깔짚 소재 최적 미생물제 선정

① 단일 및 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링

상기 (가)항의 실험을 통해 도출된 최적 혼합 깔짚 소재인 PM:BC(8:2) 깔짚과 비교를 위한 단일 소재 깔짚인 왕겨, 피트모스 및 바이오차가 축사 유사 환경에서 계분뇨에 미치는 영향을 확인하기 위해 실제 축사와 유사한 환경을 모사하여 사육 기간에 따른 계분뇨의 특성 변화를 조사하였다.

깔짚 소재별 사육 기간 중 온도 변화를 Fig. 4-5에 나타내었다. 왕겨를 깔짚으로 사용하였을 때, 사육 기간 중 온도는 저온인 28~38℃로 유지되었다. 바이오차를 깔짚으로 사용하였을 때는 왕겨와 유사하게 저온이었으며 22~38℃로 유지되었다. 피트모스를 깔짚으로 사용하였을 때는 계분뇨 투입 후 9일까지 36~43℃로 비교적 고온으로 유지되었으며, 9일 이후에 26~37℃의 저온으로 유지되었다. 혼합 깔짚인 PM:BC(8:2)를 깔짚으로 사용하였을 때, 계분뇨 투입 후 8일까지 38~45℃의 고온으로 유지되었으며, 8일 이후 28~38℃의 저온으로 유지되었다.

사육 기간 중 깔짚 종류별 온도 변화 결과를 종합하였을 때, 왕겨 및 바이오차 깔짚은 총 사육 기간인 40일간 저온으로 유지되어 계분뇨의 부숙을 촉진하는 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 후 9일 이전에 비교적 고온으로 유지되어 계분뇨의 부숙을 촉진하는 효과가 있을 것으로 기대된다. 특히, PM:BC(8:2) 깔짚은 피트모스보다 고온으로 유지되었으며, 사육 기간 전체에서도 다른 깔짚들보다 고온으로 유지되어 부숙 촉진 효과가 가장 뛰어날 것으로 판단된다.

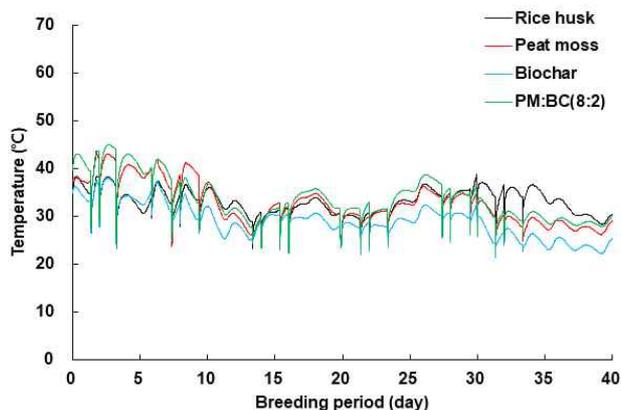


Fig. 4-5. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 중 온도 변화.

깔짚 소재별 사육 기간 중 유기물 함량 변화는 Fig. 4-6에서 보는 바와 같다. 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 유기물 함량은 각각 85.3, 97.3, 82.8 및 93.5%로 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 유기물 함량이 왕겨 및 바이오차 깔짚에 비해 10% 이상 높았으

며, 왕겨 및 바이오차 깔짚은 유기물 함량이 유사하였다.

왕겨 깔짚의 사육 기간 중 유기물 함량은 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 계분뇨 투입 후 40일에 유기물 함량이 78.6%까지 감소하였다. 바이오차 깔짚의 사육 기간 중 유기물 함량은 감소량이 뚜렷하지 않았으며, 계분뇨 투입 후 40일에 유기물 함량이 79.8%로 나타났다. 피트모스 깔짚의 사육 기간 중 유기물 함량은 급격하게 감소하여 계분뇨 투입 후 40일에 유기물 함량이 81.3%까지 감소하였다. PM:BC(8:2) 깔짚의 사육 기간 중 유기물 함량은 피트모스와 유사하게 급격하게 감소하였으며 계분뇨 투입 후 40일에 유기물 함량이 80.7%로 나타났다.

계분뇨 투입 후 40일의 깔짚 종류별 유기물 함량은 피트모스 (81.3%) > PM:BC(8:2) (80.7%) > 바이오차 (79.8%) > 왕겨 (78.6%)로 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚이 높게 나타났다. 유기물 함량은 퇴비의 품질에 영향을 주는 중요한 요소이기 때문에 유기물 함량이 높은 피트모스가 함유된 PM:BC(8:2) 깔짚이 퇴비화 시 기존에 깔짚으로 사용하던 왕겨보다 품질이 뛰어난 퇴비가 생산될 가능성이 높을 것으로 판단된다.

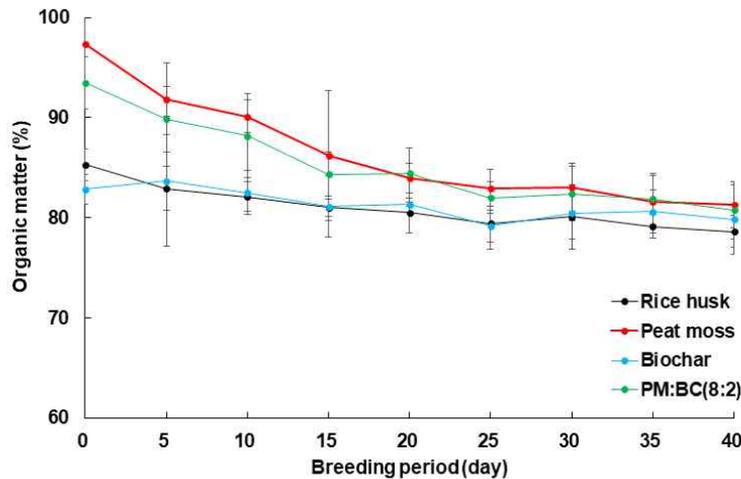


Fig. 4-6. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 중 유기물 함량 변화.

깔짚 소재별 사육 기간 중 pH 및 EC 변화는 Fig. 4-7에서 보는 바와 같다. 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 초기 pH는 각각 4.47 및 4.42 였으며, 계분뇨 투입 후 5일에 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 pH가 증가하여 각각 6.38 및 6.69로 계분뇨 투입 후 5일까지 약산성의 pH를 유지하였다. 계분뇨 투입 5일 이후에 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 pH는 증가하였다가 감소하는 경향을 보이며 중성 pH를 유지하였다.

왕겨 및 바이오차 깔짚은 사육 기간 초기부터 약염기성의 pH를 유지하였다. 왕겨 깔짚의 초기 pH는 6.65로 약산성이었으나 계분뇨 투입 5일 후에 pH가 8.91로 증가하였으며, 계분뇨 투입 5일 이후 pH는 서서히 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며 pH 7.90 이상으로 유지되었고 계분뇨 투입 후 40일에 7.36으로 감소하였다. 바이오차 깔짚의 사육 기간 중 pH는 증가 및 감소를 반복하여 pH 7.78~8.89의 약염기성으로 유지되었다.

암모니아 가스는 가금류의 건강에 치명적인 영향을 미쳐 가금류의 생산량을 좌우하는 요소 중 하나이다. 일반적으로 암모니아 가스는 pH 7 이상에서 발생하기 시작하여 pH가 증가할수록 암모니아 가스의 발생이 급격하게 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 사육 기간 중 약염기성으로 유지되는 왕겨 및 바이오차 깔짚은 암모니아 발생을 억제하지 못하여 다량의 암모니아 가스가 발생할 것으로 판단된다. 반면에 약산성의 pH가 유지되는 피트모스 및

PM:BC(8:2) 깔짚은 사육 기간 초기의 암모니아 가스 발생을 억제하여 축사에서 발생하는 암모니아 가스 발생량을 크게 감소할 수 있을 것으로 사료된다. 이상의 결과를 통해 PM:BC(8:2) 깔짚의 사용은 가금류 생산량을 증대시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사육 기간 중 바이오차의 EC는 초기 3.40 dS/m에서 감소하다가 유지되는 경향을 보였고 다른 깔짚들의 EC는 초기 0.06~0.52 dS/m에서 증가하다 유지되는 경향을 보였으며, 계분뇨 투입 후 40일의 깔짚 종류별 EC는 1.84~2.05로 유의적인 차이가 나타나지 않았다.

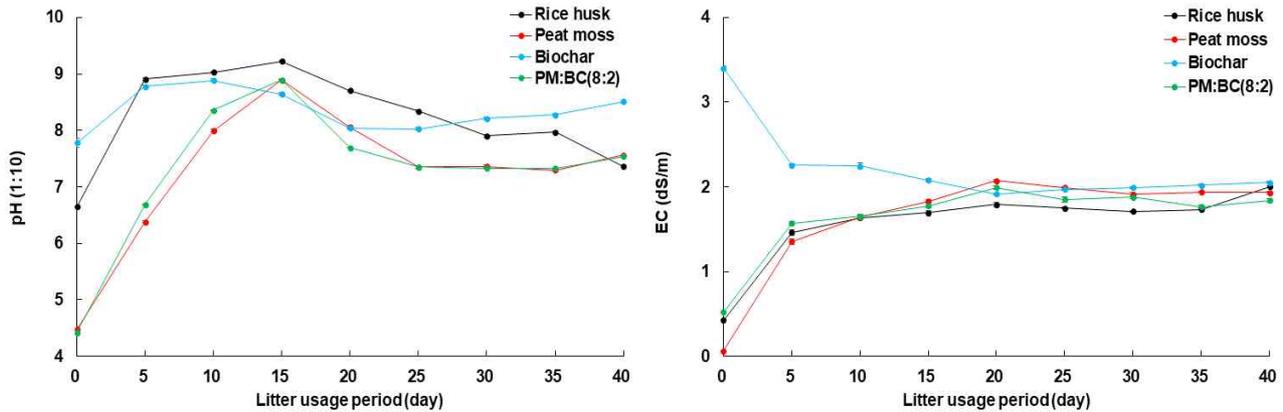


Fig. 4-7 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 중 pH 및 EC 변화.

깔짚 소재별 사육 기간 중 부숙도 변화를 조사하기 위하여 종자발아법을 수행하여 발아지수를 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 4-8에서 보는 바와 같다.

왕겨를 깔짚으로 사용하였을 때, 계분뇨 투입 5일 후의 발아지수는 168.8로 다른 깔짚과 비교하였을 때 발아지수가 가장 높았지만 계분뇨가 투입될수록 발아지수가 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 최종적으로 계분뇨 투입 40일 후 발아지수가 41.2로 나타났으며, 부숙 완료의 발아지수 기준인 70보다 낮은 미부숙 상태가 되었다.

피트모스를 깔짚으로 사용하였을 때, 계분뇨 투입 5일 후의 발아지수는 97.1이었으나 계분뇨가 투입되면서 발아지수가 증가 및 감소를 반복하여 계분뇨 투입 40일 후 발아지수는 45.5로 왕겨보다 4.3 높게 나타났다.

바이오차 깔짚의 경우, 계분뇨 투입 5일 후의 발아지수는 68.6으로 다른 깔짚보다 낮았으며 피트모스 깔짚과 유사하게 발아지수가 증가 및 감소를 반복하였다. 바이오차 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 발아지수는 29.9로 다른 깔짚들과 비교하였을 때 수치가 가장 낮았다.

PM:BC(8:2) 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 5일 후의 발아지수는 149.7로 발아지수가 매우 높았으며, 사육 기간이 경과 함에 따라 발아지수가 서서히 감소되는 경향을 보였다. 최종적으로 계분뇨 투입 40일 후의 발아지수는 42.0으로 왕겨의 발아지수와 유사하였다.

상기 깔짚 소재별 사육 기간 중 발아지수의 변화 결과를 종합해보면 바이오차 깔짚은 다른 깔짚들에 비해 발아지수가 크게 차이 나기 때문에 바이오차 단일 소재 깔짚은 부숙도에 악영향을 미친다고 판단하였다. 바이오차를 제외한 왕겨, 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚은 사육 기간 중의 발아지수에 유의적인 차이가 나타나지 않았으므로 퇴비화 과정에서의 부숙도 변화를 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다.

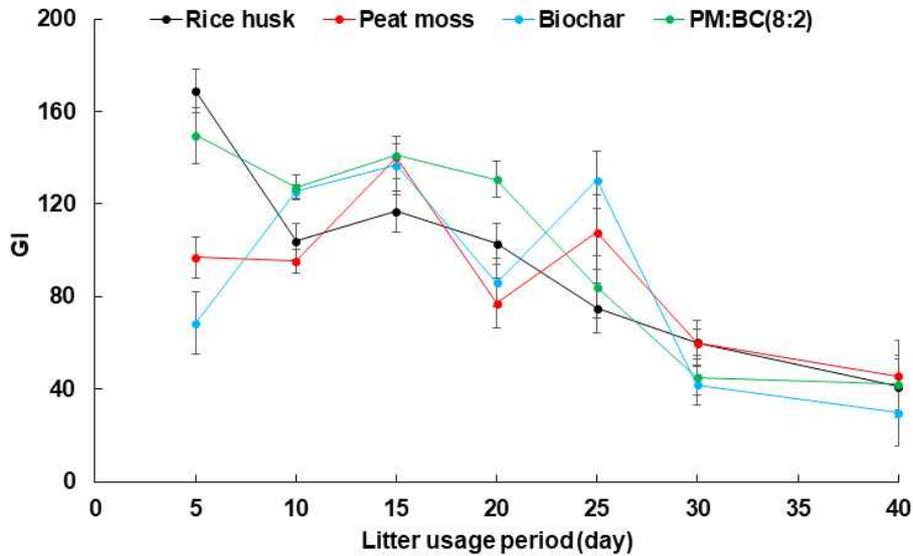


Fig. 4-8. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 중 발아지수(GI) 변화.

② 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링

계사 전용 최적 혼합 깔짚의 악취 저감, 부숙 촉진 및 퇴비 품질을 향상시키기 위해 최적 혼합 깔짚인 PM:BC(8:2) 깔짚에 단일 미생물제를 첨가하여 깔짚을 제조하였으며, 축사 유사 환경에서 미생물제가 계분뇨에 미치는 영향을 확인하기 위해 실제 축사와 유사한 환경을 모사하여 사육 기간에 따른 계분뇨의 특성 변화 및 퇴비화 과정 중의 계분뇨의 특성 변화를 조사하였다. 본 시험에서 단일 미생물은 *Bacillus subtilis* (B), *Lactobacillus sakei* (L), *Saccharomyces cerevisiae* (S) 및 *Alcaligenes faecalis* (A)를 사용하였다.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 온도 변화를 Fig. 4-9에 나타내었으며 대조구로 미생물을 첨가하지 않은 혼합 깔짚을 사용하였다. 사육 기간 중 미생물 미첨가 혼합 깔짚 및 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 온도 변화는 유의적인 차이가 나타나지 않고 유사한 경향을 보였다. 따라서 단일 미생물의 첨가가 계분뇨의 온도 변화에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단되었다.

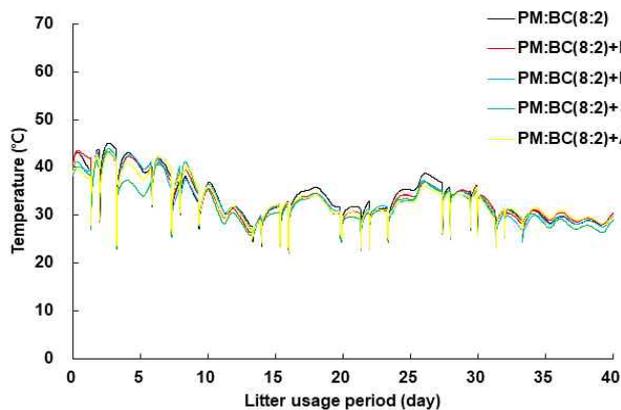


Fig. 4-9. 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 중 온도 변화.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 유기물 함량 변화를 Fig. 4-10에 나타내었으며 대조구로 미생물을 첨가하지 않은 혼합 깔짚을 사용하였다. 사육 기간 중 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚 및 미생물 미첨가 혼합 깔짚의 유기물 함량 변화는 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 따라서 단일 미생물의 첨가는 사육 기간 중 계분뇨의 유기물 함량 변화에 거의 영향

을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

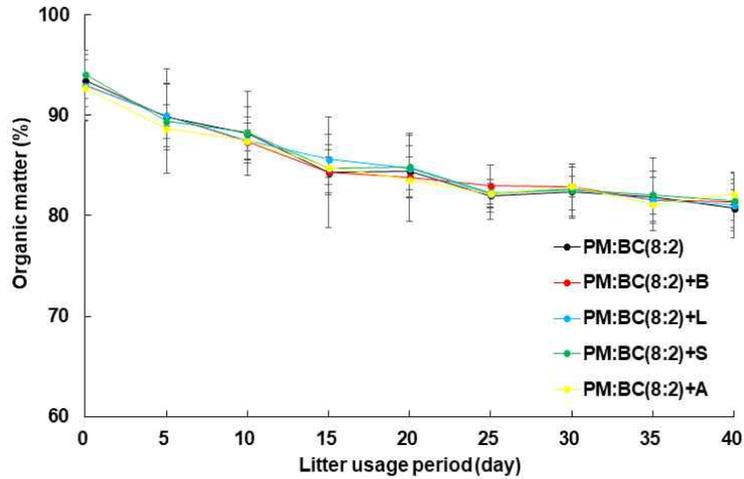


Fig. 4-10. 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 중 유기물 함량 변화.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 pH 및 EC 변화를 Fig. 4-11에 나타내었으며 대조구로 미생물을 첨가하지 않은 혼합 깔짚을 사용하였다. 사육 기간 중 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚 및 미생물 미첨가 혼합 깔짚의 pH 및 EC 함량 변화 경향이 매우 유사하게 나타났으며, 단일 미생물의 첨가는 사육 기간 중 계분뇨의 pH 및 EC 함량 변화에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

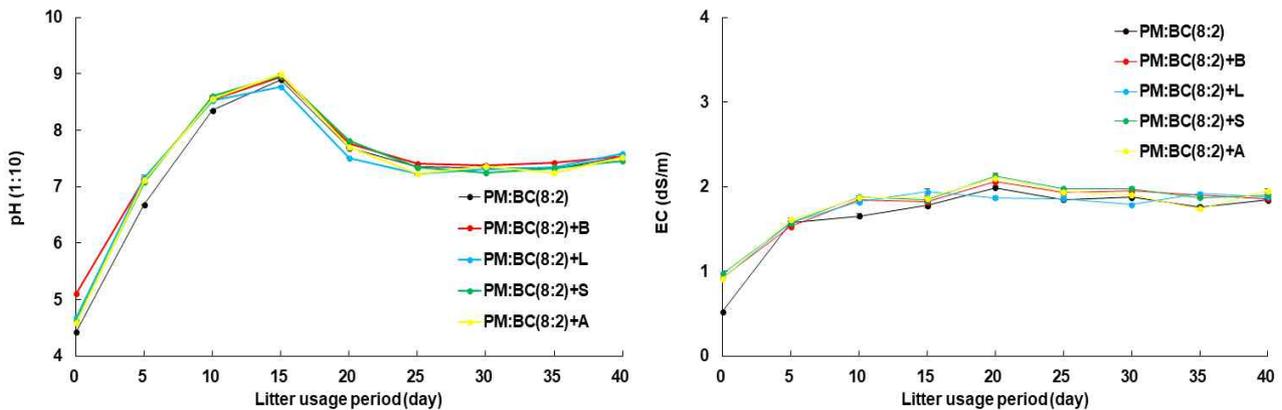


Fig. 4-11. 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 중 pH 및 EC 변화.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 부숙도 변화를 조사하기 위하여 종자발아법을 수행하여 발아지수를 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 4-12에서 보는 바와 같다.

PM:BC(8:2)+B 및 PM:BC(8:2)+S 깔짚을 사용한 경우, 발아지수는 계분뇨 투입 후 5일에서 15일까지 증가한 후 15일부터 감소하는 경향을 보였으며, PM:BC(8:2)+B 및 PM:BC(8:2)+S 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 발아지수는 각각 63.5 및 46.5로 나타났다.

PM:BC(8:2), PM:BC(8:2)+L 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 경우, 사육 기간이 경과 함에 따라 전반적으로 발아지수가 감소되는 경향을 보였으며, PM:BC(8:2), PM:BC(8:2)+L 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 발아지수는 각각 42.0, 45.1 및 48.6으로 확인되어 단일 미생물 첨가 시 부숙도가 조금 향상되지만 큰 차이가 나타나지 않았다.

사육 기간 중 발아지수 변화 결과를 미루어 볼 때, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 및 *Alcaligenes faecalis* 등의 단일 미생물의 첨가는 사육 기간 중 부숙도 촉진에

큰 영향을 미치지 못하였다. 반면에 *Bacillus subtilis*가 첨가된 혼합 깔짚인 PM:BC(8:2)+B를 적용 시 계분뇨 투입 40일 후의 발아지수가 다른 미생물이 첨가된 깔짚에 비해 높은 63.5로 확인되었다. 따라서 PM:BC(8:2)+B가 부숙화 촉진에 유리할 것으로 판단된다.

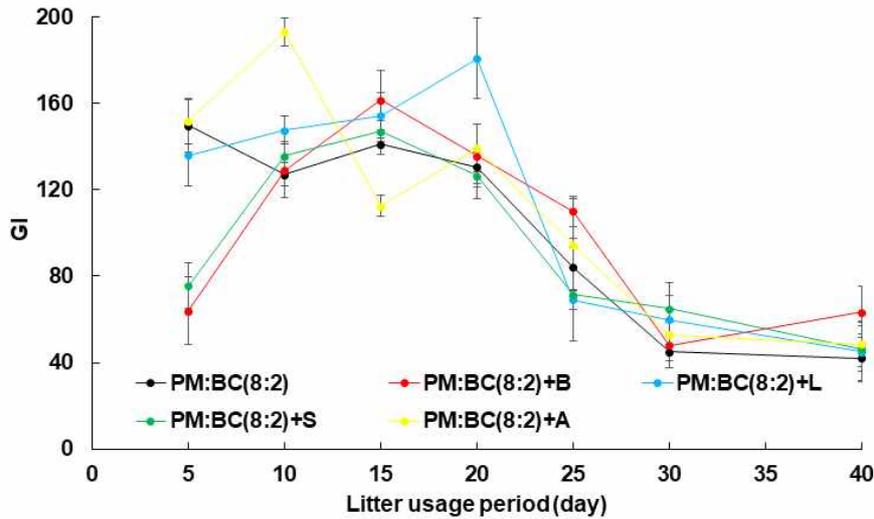


Fig. 4-12. 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 중 발아지수(GI) 변화.

상기 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 계분뇨의 특성 변화를 조사한 결과, 단일 미생물의 첨가는 깔짚의 수분 조절 능력 및 퇴비 품질 향상에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되었다.

③ 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 축사 유사 환경에서의 깔짚 상태 모니터링

상기 (라)-① 항의 결론에서 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚은 계분뇨에 대한 수분 조절 능력 및 퇴비 품질 향상에 큰 영향을 미치지 못하였기 때문에 이를 보완하기 위해 미생물을 혼합하여 깔짚에 적용한 후 축사 유사 환경에서 혼합 미생물제가 계분뇨에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 본 시험에서 혼합 미생물은 *Bacillus subtilis* (B), *Lactobacillus sakei* (L) 및 *Saccharomyces cerevisiae* (S)를 혼합한 BLS 미생물제와 *Bacillus subtilis* (B), *Lactobacillus sakei* (L), *Saccharomyces cerevisiae* (S) 및 *Alcaligenes faecalis* (A)를 혼합한 BLSA 미생물제 두 가지를 사용하였으며, 실제 축사와 유사한 환경을 모사하여 사육 기간에 따른 계분뇨의 특성 변화 및 퇴비화 과정 중의 계분뇨의 특성 변화를 조사하였다.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 온도 변화를 Fig. 4-13에 나타내었으며 대조구로 미생물을 첨가하지 않은 혼합 깔짚을 사용하였다. 미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚을 사용하였을 때 사육 기간 중 온도가 전반적으로 높게 나타났다. 혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 사육 기간 중 온도가 전반적으로 미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚보다 낮게 나타났으며, 혼합 미생물이 적용된 두 깔짚의 온도 변화는 유사한 경향을 보였다.

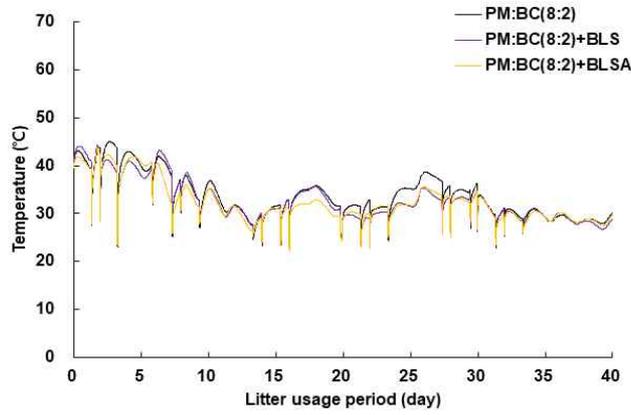


Fig. 4-13. 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 중 온도 변화.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 유기물 함량 변화를 Fig. 4-14에 나타내었다. 사육 기간 중 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 유기물 함량은 전체적으로 PM:BC(8:2) 깔짚에 비해 낮게 유지되었으나, 계분뇨 투입 40일 후에 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 유기물 함량은 81.2%로 PM:BC(8:2) 깔짚의 유기물 함량인 80.7%보다 높았다. PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 유기물 함량은 전체 사육 기간동안 PM:BC(8:2) 깔짚과 유사하였으며, PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 유기물 함량이 PM:BC(8:2) 깔짚의 유기물 함량보다 높은 것이 확인되었다. 계분뇨 투입 40일 후에 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 유기물 함량은 81.5%로 PM:BC(8:2) 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 유기물 함량보다 높아 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 사용은 비옥한 퇴비를 생산하는데 유리할 것으로 판단되었다.

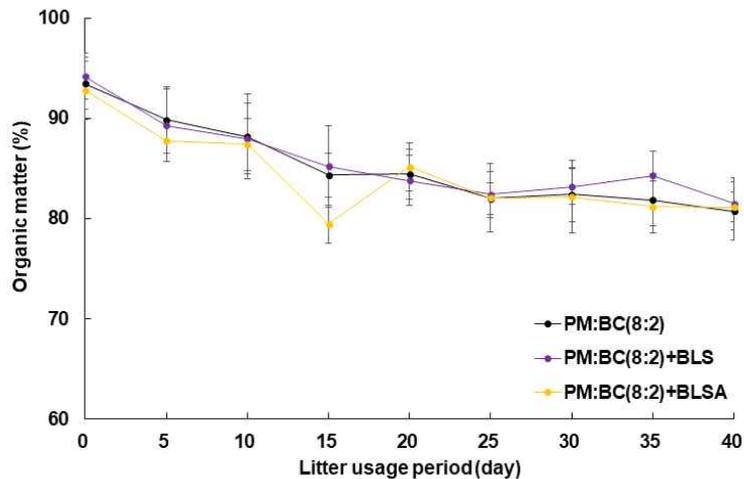


Fig. 4-14. 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 중 유기물 변화.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 pH 및 EC 변화를 Fig. 4-15에 나타내었다.

미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚과 혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA의 사육 기간 중 pH는 계분뇨 투입 후 15일까지 증가하다가 15일을 기점으로 감소하는 경향을 보였으며 세 처리구 사이에 pH의 변화는 유사하게 나타났다. 사육 기간 중 EC의 변화도 PM:BC(8:2), PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 세 처리구간에는 유의적인 차이가 나타나지 않고 유사하였다.

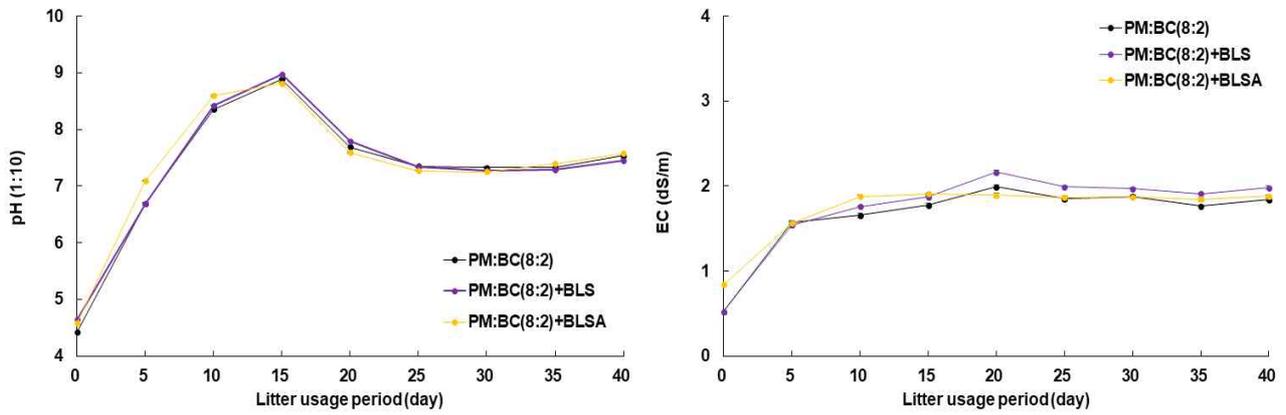


Fig. 4-15. 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 중 pH 및 EC 변화.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 부숙도 변화를 조사하기 위하여 종자발아법을 수행하여 발아지수를 도출하였고 대조구로 미생물이 첨가되지 않은 혼합 깔짚을 사용하였으며, 그 결과는 Fig. 4-16에서 보는 바와 같다.

PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚을 사용하였을 때, 사육 기간에 따라 발아지수가 감소하는 경향을 보였으며, 계분뇨 투입 40일 후의 발아지수는 41.2로 PM:BC(8:2) 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후의 발아지수인 42.0보다 낮게 나타나 부숙 촉진 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

PM:BC(8:2)+BLS 깔짚을 사용하였을 경우, 계분뇨 투입 후 5일에서 15일까지 발아지수가 증가하다가 15일을 기점으로 감소하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후의 발아지수는 64.2로 PM:BC(8:2) 깔짚의 발아지수보다 22.2 높아 BLS 혼합 미생물을 깔짚에 적용하였을 때 부숙 촉진에 기여하는 것으로 사료된다.

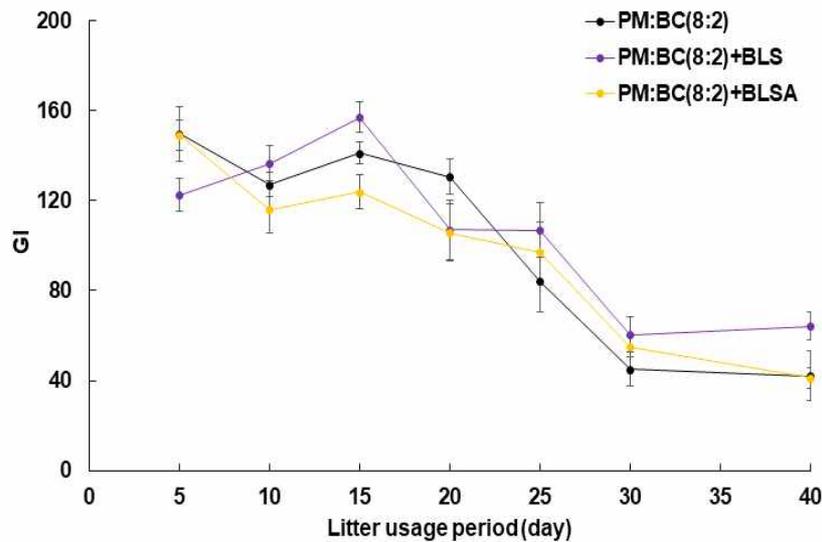


Fig. 4-16. 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 중 발아지수(GI) 변화.

상기 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 중 계분뇨의 특성 변화를 조사한 결과, BLSA 혼합 미생물의 첨가는 깔짚의 수분 조절 능력 및 퇴비 품질 향상에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되었다. 반면에 BLS 혼합 미생물의 첨가는 깔짚의 수분 조절 능력 향상 및 가금류 사육 기간 중 계분뇨의 1차 발효 효과를 통해 퇴비 부숙화 증진에 기여할 것으로 기대되어 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚을 계사 전용 최적 깔짚으로 선정하였다.

(라) 각 조건에서 생산된 계분뇨 퇴비의 품질특성 및 안정성 평가

① 계분뇨 퇴비의 품질 특성

계분뇨 퇴비의 품질 특성을 평가하기 위하여 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 무기성분 함량 변화를 조사하였다. 무기성분은 K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Al, B 및 P를 분석하였으며 분석 결과는 Table 4-5~13 에서 보는 바와 같다. N 함량은 현재 분석 중에 있다.

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 P 함량 변화는 Table 4-5에 나타내었다. 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 P 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 이는 계분뇨가 P 함량이 높기 때문이다. 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 40일 후 각각 4345, 4552, 3701 및 6056 mg/kg의 P가 검출되었다.

사육 기간이 증가할수록 단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚은 미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚과 유사하게 P 함량이 서서히 증가하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 P 함량은 각각 4463, 4448, 4049 및 4179 mg/kg으로 깔짚 종류에 따른 P 함량에는 유의적인 차이가 나타나지 않았다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚의 P 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후에 P 함량은 각각 4723 및 4309 mg/kg으로 검출되었으며, BLS 미생물이 첨가된 깔짚의 P 함량이 더 높았다.

Table 4-5. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 P 함량 변화

Litter	Unit : mg/kg						
	깔짚 사용 기간 (day)						
	0	5	10	15	25	30	40
Rice husk	542.4	2611.3	3223.1	3426.9	4324.4	4397.3	4344.6
Peat moss	53.2	2373.3	2618.8	3576.2	3672.9	3764.1	4552.4
Biochar	736.0	2230.1	3017.3	3720.7	4487.9	3922.3	3701.3
PM:BC(8:2)	454.9	1848.3	3301.0	5003.5	3891.8	4839.3	6055.6
PM:BC(8:2)+B	395.3	2684.6	2242.1	3101.5	5502.4	4196.0	4463.0
PM:BC(8:2)+L	334.8	2140.6	3653.9	3743.5	3576.2	3953.3	4448.2
PM:BC(8:2)+S	397.1	1960.7	2997.3	3219.6	3949.9	4003.8	4048.5
PM:BC(8:2)+A	365.6	2089.8	2800.2	2499.5	5498.4	6095.8	4179.3
PM:BC(8:2)+BLS	2859.7	3741.6	3491.5	3540.9	3665.4	4620.4	4723.3
PM:BC(8:2)+BLSA	362.3	2072.2	2176.4	3418.3	4181.7	4289.7	4309.0

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 K 함량 변화는 Table. 4-6에 나타내었다. 왕겨 및 바이오차 단일 소재 깔짚은 계분뇨 투입 전부터 K 함량이 각각 2957 및 2821 mg/kg으로 높은 K 함량을 보유하고 있었으며 피트모스 단일 소재 깔짚은 K 성분이 검출되지 않았다. PM:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 전 K 함량이 837 mg/kg 검출되었다. 사육 기간이 경과 함에 따라 K 함량

은 모든 처리구에서 증가하는 경향이었으며, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 K 함량은 각각 5417, 4921, 4814 및 5120 mg/kg이었다.

단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚의 K 함량은 사육 기간이 증가할수록 K 함량이 증가하여 미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚과 유사한 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 K 함량은 각각 5436, 5343, 5134, 4995 mg/kg으로 PM:BC(8:2)+B 깔짚의 K 함량이 가장 높았다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚의 K 함량은 PM:BC(8:2) 깔짚과 유사하게 계분뇨가 투입될수록 증가하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후에 K 함량은 각각 5704 및 5068 mg/kg으로 확인되었다. 혼합 깔짚에 BLS 미생물을 첨가하였을 때 단일 미생물 및 BLSA 미생물을 처리하였을 때보다 K 함량이 높았다.

Table 4-6. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 K 함량 변화

Litter	Unit : mg/kg						
	깔짚 사용 기간 (day)						
	0	5	10	15	25	30	40
Rice husk	2957.3	4244.6	4644.1	4409.4	5166.3	5240.7	5417.3
Peat moss	ND	2754.8	3573.1	4260.6	5009.6	5208.7	4920.7
Biochar	2821.2	3635.0	4227.4	4723.7	4953.0	5173.9	4814.3
PM:BC(8:2)	837.4	2940.8	3408.4	4016.5	5040.1	5092.8	5120.1
PM:BC(8:2)+B	693.8	2908.4	3821.4	3893.2	5062.7	5083.3	5435.7
PM:BC(8:2)+L	639.5	2810.6	3671.2	3993.2	5313.3	4984.8	5343.1
PM:BC(8:2)+S	808.6	3072.5	3824.1	4120.2	4933.4	5152.8	5134.4
PM:BC(8:2)+A	686.8	2894.1	3753.1	4174.6	5070.5	5127.7	4995.9
PM:BC(8:2)+BLS	2363.9	3994.8	4751.2	5004.5	5170.0	5559.2	5704.0
PM:BC(8:2)+BLSA	628.9	3070.2	3759.8	4343.4	4899.2	5361.4	5068.4

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Ca 함량 변화는 Table 4-7에 나타내었다. 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚은 계분뇨 투입 전 Ca 함량이 각각 591 및 27 mg/kg으로 낮은 Ca 함량을 보유하고 있었으며 바이오차 단일 소재 깔짚의 Ca 함량은 10244 mg/kg으로 Ca를 가장 많이 보유하고 있었다. PM:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 전 Ca 함량이 5464 mg/kg 검출되었다. Ca 함량이 낮았던 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚은 사육 기간이 경과 함에 따라 Ca 함량이 증가하는 경향을 보였으며, 초기 Ca 함량이 높았던 바이오차의 Ca 함량은 시간이 지날수록 감소하는 경향이였다. 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Ca 함량은 각각 4920, 4889, 5432 및 7414 mg/kg 검출되었으며, PM:BC(8:2) 깔짚의 Ca 함량이 가장 높았다.

사육 기간이 증가할수록 단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚의 Ca 함량은 서서히 증가하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚

사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Ca 함량은 각각 5299, 5622, 4852 및 4980 mg/kg으로 PM:BC(8:2)+L 깔짚의 Ca 함량이 가장 높았다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚의 Ca 함량은 계분뇨가 투입될수록 서서히 증가하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후에 Ca 함량은 각각 5102 및 5388 mg/kg으로 Ca 함량이 유사하였다.

Table 4-7. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Ca 함량 변화

Litter	깔짚 사용 기간 (day)						
	0	5	10	15	25	30	40
Rice husk	590.9	3157.8	3011.9	3896.0	4892.9	4785.9	4919.9
Peat moss	27.2	3093.1	2121.4	4286.1	4496.2	4573.3	4888.7
Biochar	10243.9	11446.0	6243.0	9053.3	6983.7	6559.7	5431.8
PM:BC(8:2)	5464.4	3865.5	3675.9	6774.2	4877.3	5800.7	7413.7
PM:BC(8:2)+B	3746.6	4684.4	2882.6	4500.0	5781.3	6960.2	5299.2
PM:BC(8:2)+L	2908.6	4076.0	3908.3	5399.6	4987.5	5564.3	5622.1
PM:BC(8:2)+S	3791.0	4137.9	3821.2	4525.6	5042.3	4891.6	4851.5
PM:BC(8:2)+A	3253.6	4162.5	3429.0	3781.7	6457.8	6809.5	4979.9
PM:BC(8:2)+BLS	3042.9	4587.9	3761.8	4610.0	5242.8	5103.1	5101.6
PM:BC(8:2)+BLSA	2454.9	4344.0	3325.3	4789.9	5022.1	4943.2	5388.2

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Mg 함량 변화는 Table. 4-8에 나타내었다. 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚은 계분뇨 투입 전 Mg 함량이 각각 263 및 52 mg/kg으로 낮은 Mg 함량을 보유하고 있었으며 바이오차 단일 소재 깔짚의 Mg 함량은 4049 mg/kg으로 Mg을 가장 많이 보유하고 있었다. PM:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 전 Mg 함량이 1514 mg/kg 검출되었다. Mg 함량이 낮았던 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚은 사육 기간이 경과 함에 따라 Mg 함량이 증가하는 경향이었으며, 초기 Mg 함량이 높았던 바이오차의 Mg 함량은 계분뇨가 투입될수록 감소하는 경향을 보였다. 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Mg 함량은 각각 1720, 1455, 1649 및 1961 mg/kg 검출되었으며, PM:BC(8:2) 깔짚의 Mg 함량이 가장 높았다.

사육 기간이 증가할수록 단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚은 미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚과 유사하게 Mg 함량이 서서히 증가하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Mg 함량은 각각 1579, 1565, 1605 및 1448 mg/kg으로 PM:BC(8:2)+B 깔짚의 Mg 함량이 가장 높았다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚의 Mg 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 유지되거나 서서히 증가하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후에 Mg 함량은 각각 1659 및 1530 mg/kg으로 큰 차이가 나타나지 않았다.

Table 4-8. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Mg 함량 변화

Unit : mg/kg

Litter	깔짚 사용 기간 (day)						
	0	5	10	15	25	30	40
Rice husk	262.7	946.3	1136.0	1201.4	1466.7	1431.6	1720.2
Peat moss	52.2	876.3	1102.9	1265.7	1276.7	1245.4	1454.9
Biochar	4048.6	2531.1	2215.1	2250.4	1983.5	1824.3	1648.7
PM:BC(8:2)	1514.0	1220.8	1428.7	1595.6	1523.9	1563.2	1960.9
PM:BC(8:2)+B	1246.7	1297.0	1170.9	1315.4	2165.8	1434.6	1578.9
PM:BC(8:2)+L	1098.7	1194.5	1491.3	1363.0	1366.9	1483.0	1564.7
PM:BC(8:2)+S	1174.9	1277.2	1263.2	1448.3	1439.3	1494.3	1605.3
PM:BC(8:2)+A	1117.0	1264.1	1234.4	1123.5	1967.7	2233.0	1448.0
PM:BC(8:2)+BLS	1715.9	1704.9	1432.4	1523.2	1359.6	1630.8	1658.8
PM:BC(8:2)+BLSA	863.0	1288.7	1051.3	1376.9	1510.9	1422.9	1530.3

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Na 함량 변화는 Table. 4-9에서 보는 바와 같다. 왕겨 단일 소재 깔짚은 계분뇨 투입 전 Na 함량이 51 mg/kg 검출되었으며 피트모스 단일 소재 깔짚은 Na 성분이 검출되지 않았다. 바이오차 단일 소재 깔짚의 Na 함량은 5763 mg/kg으로 Na를 가장 많이 보유하고 있었다. PM:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 전 Na 함량이 1148 mg/kg 검출되었는데, 이는 바이오차의 Na 함량이 높기 때문이다. Na 함량이 낮았던 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚은 사육 기간이 경과 함에 따라 Na 함량이 증가하는 경향이었으며, 초기 Na 함량이 높았던 바이오차의 Na 함량은 계분뇨가 투입될수록 감소하는 경향을 보였다. 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Na 함량은 각각 907, 562, 1153 및 731 mg/kg 검출되었다.

사육 기간이 증가할수록 단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚은 Na 함량이 서서히 감소하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Na 함량은 각각 874, 844, 841 및 833 mg/kg으로 검출되었으며, 단일 미생물이 처리된 깔짚 종류에 따른 Na 함량의 유의적인 차이는 나타나지 않았다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 Na 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보였으며, PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 Na 함량은 서서히 감소하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후에 Na 함량은 각각 686 및 849 mg/kg으로 유의적인 차이가 나타나지 않았다.

Table 4-9. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Na 함량 변화.

Litter	깔짚 사용 기간 (day)						
	0	5	10	15	25	30	40
Rice husk	51.2	463.3	540.3	490.5	587.0	661.6	907.4
Peat moss	0.0	335.2	457.3	560.6	573.5	708.4	561.6
Biochar	5762.9	2697.5	2134.9	1879.0	1354.1	1401.3	1152.7
PM:BC(8:2)	1147.9	895.5	683.2	671.0	759.6	849.4	731.3
PM:BC(8:2)+B	1794.5	1153.4	1069.5	839.6	917.1	884.7	874.1
PM:BC(8:2)+L	1659.8	1073.1	992.7	889.4	995.2	937.4	843.9
PM:BC(8:2)+S	1466.7	1293.1	1053.2	996.5	952.9	903.3	841.2
PM:BC(8:2)+A	1581.4	1121.1	1006.7	929.9	931.4	882.8	833.1
PM:BC(8:2)+BLS	143.3	444.8	628.5	549.2	648.9	721.1	685.7
PM:BC(8:2)+BLSA	1123.7	1117.4	1018.8	941.8	865.6	615.4	848.5

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Fe 함량 변화는 Table 4-10에서 보는 바와 같다. 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚의 계분뇨 투입 전 Fe 함량은 각각 28 및 5 mg/kg으로 매우 낮게 검출되었으며, 사육 기간이 경과 함에 따라 Fe 함량이 증가하는 경향을 보였다. 바이오차 단일 소재 깔짚 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 Fe 함량은 각각 549 및 619 mg/kg으로 검출되었으며, 사육 기간이 경과 함에 따라 Fe 함량이 서서히 감소하는 경향을 보였다. 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Fe 함량은 각각 312, 379, 338 및 307 mg/kg 검출되었다.

사육 기간이 증가할수록 단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚은 미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚과 유사하게 Fe 함량이 서서히 감소하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Fe 함량은 각각 301, 477, 313 및 326 mg/kg으로 검출되었으며, PM:BC(8:2)+L 깔짚의 Fe 함량이 가장 높았고 다른 미생물이 첨가된 깔짚의 Fe 함량은 유사하게 나타났다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 Fe 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 특정한 경향이 나타나지 않았으며 초기 Fe 함량 645 mg/kg에서 계분뇨 투입 40일 후 381 mg/kg으로 감소하였다. PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 Fe 함량은 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚과 유사하게 특정한 경향이 나타나지 않았으며, 초기 Fe 함량 393 mg/kg에서 계분뇨 투입 40일 후 430 mg/kg으로 증가하였다.

Table 4-10. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Fe 함량 변화.

Litter	깔짚 사용 기간 (day)							Unit : mg/kg
	0	5	10	15	25	30	40	
Rice husk	27.9	241.5	243.1	234.5	262.4	262.5	311.8	
Peat moss	5.0	413.0	288.7	285.6	267.1	415.7	379.2	
Biochar	549.5	574.8	514.0	654.6	473.6	263.5	337.9	
PM:BC(8:2)	619.4	397.5	366.5	365.3	319.1	340.6	307.4	
PM:BC(8:2)+B	482.4	399.5	331.4	297.2	388.5	353.4	300.9	
PM:BC(8:2)+L	485.9	363.6	348.2	356.4	355.6	303.6	476.7	
PM:BC(8:2)+S	513.7	309.3	351.0	320.4	345.8	377.2	313.0	
PM:BC(8:2)+A	463.0	325.3	350.1	235.2	329.1	504.7	326.0	
PM:BC(8:2)+BLS	645.0	377.9	350.3	297.9	551.2	345.2	380.6	
PM:BC(8:2)+BLSA	393.4	433.6	259.4	432.0	324.7	265.2	429.8	

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Mn 함량 변화는 Table 4-11에서 보는 바와 같다. 바이오차 깔짚을 제외한 왕겨, 피트모스, PM:BC(8:2) 깔짚의 Mn 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 왕겨 단일 소재 깔짚은 계분뇨 투입 전 Mn 함량이 129 mg/kg에서 계분뇨 투입 40일 후 166 mg/kg으로 소량 증가하였다. 피트모스 단일 소재 깔짚은 계분뇨 투입 전 Mn 함량이 0 mg/kg에서 계분뇨 투입 40일 후 181 mg/kg으로 증가하였다. PM:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 전 Mn 함량이 84 mg/kg에서 계분뇨 투입 40일 후 230 mg/kg으로 증가하였다. 바이오차 단일 소재 깔짚의 Mn 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 계분뇨 투입 전 Mn 함량이 216 mg/kg에서 계분뇨 투입 40일 후 173 mg/kg으로 감소하였다.

사육 기간이 증가할수록 단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚은 미생물 종류에 상관없이 Mn 함량이 서서히 증가하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 Mn 함량은 각각 175, 185, 171 및 168 mg/kg 검출되었으며, 단일 미생물이 처리된 깔짚 종류에 따른 Mn 함량은 유의적인 차이가 나타나지 않았다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 Mn 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보였으며, PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후에 Mn 함량은 각각 182 및 177 mg/kg으로 매우 유사하였다.

Table 4-11. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 Mn 함량 변화.

Litter	깔짚 사용 기간 (day)						
	0	5	10	15	25	30	40
Rice husk	129.0	153.8	168.2	185.2	192.1	186.5	165.6
Peat moss	ND	105.5	108.9	151.1	155.6	157.8	180.7
Biochar	215.8	204.9	201.6	216.4	212.8	193.1	172.8
PM:BC(8:2)	84.2	106.6	162.3	220.1	181.2	189.9	230.3
PM:BC(8:2)+B	72.7	144.9	120.1	149.9	208.0	182.6	174.9
PM:BC(8:2)+L	57.0	119.7	164.0	145.9	167.2	178.7	185.4
PM:BC(8:2)+S	77.2	107.6	132.3	147.8	175.0	163.5	170.6
PM:BC(8:2)+A	71.1	113.4	133.0	113.8	212.9	221.2	168.2
PM:BC(8:2)+BLS	73.7	139.3	135.1	135.3	163.5	180.7	182.3
PM:BC(8:2)+BLSA	51.1	117.5	111.7	149.0	178.9	179.3	177.5

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 AI 함량 변화는 Table 4-12에 나타내었다. 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚은 계분뇨 투입 전 AI 함량이 각각 18 및 37 mg/kg으로 낮은 Mg 함량을 보유하고 있었으며 바이오차 단일 소재 깔짚의 AI 함량은 716 mg/kg으로 검출되었다. PM:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 전 AI 함량이 803 mg/kg 검출되었다. AI 함량이 낮았던 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚은 사육 기간이 경과 함에 따라 AI 함량이 증가하는 경향이었으며, 초기 AI 함량이 높았던 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 AI 함량은 계분뇨가 투입될수록 감소하는 경향을 보였다. 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 AI 함량은 각각 282, 260, 378 및 230 mg/kg 검출되었으며, 바이오차 깔짚의 AI 함량이 가장 높았다.

사육 기간이 증가할수록 단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚은 미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚과 유사하게 AI 함량이 서서히 감소하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 AI 함량은 각각 364, 318, 277 및 259 mg/kg으로 PM:BC(8:2)+B 깔짚의 AI 함량이 가장 높았다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚의 AI 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 감소하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후에 AI 함량은 각각 304 및 316 mg/kg으로 큰 차이가 나타나지 않았다.

Table 4-12. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 AI 함량 변화.

Unit : mg/kg

Litter	깔짚 사용 기간 (day)						
	0	5	10	15	25	30	40
Rice husk	18.2	94.0	154.7	83.4	196.0	210.6	282.3
Peat moss	37.5	257.1	207.0	330.7	240.1	321.8	259.7
Biochar	715.5	749.1	562.2	577.1	464.9	485.6	378.4
PM:BC(8:2)	803.2	435.8	353.1	254.3	314.1	319.1	230.5
PM:BC(8:2)+B	662.9	403.1	303.8	313.9	327.7	356.0	363.7
PM:BC(8:2)+L	589.4	376.0	324.8	338.3	316.0	294.7	317.5
PM:BC(8:2)+S	653.8	362.1	306.4	405.9	302.8	336.1	277.0
PM:BC(8:2)+A	613.2	396.0	334.2	235.4	292.3	371.6	259.3
PM:BC(8:2)+BLS	742.6	502.5	352.8	377.5	389.2	340.6	304.1
PM:BC(8:2)+BLSA	542.9	470.8	241.4	363.0	263.5	191.8	315.5

깔짚 소재별 사육 기간에 따른 B 함량 변화는 Table 4-13에 나타내었다. 왕겨 및 피트모스 단일 소재 깔짚은 계분뇨 투입 전 B 성분이 검출되지 않았으며 사육 기간이 경과 함에 따라 B 함량이 유지되다가 증가하는 경향을 보였다. 바이오차 단일 소재 깔짚의 계분뇨 투입 전 B 함량은 249 mg/kg 검출되었으며 사육 기간이 경과 함에 따라 B 함량이 감소되어 계분뇨 투입 40일 후 20 mg/kg의 B가 검출되었다. PM:BC(8:2) 깔짚은 계분뇨 투입 전 B 함량이 56 mg/kg 검출되었으며 사육 기간이 경과 함에 따라 B 함량이 감소되어 계분뇨 투입 40일 후 5 mg/kg의 B가 검출되었다.

사육 기간이 증가할수록 단일 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚은 미생물이 첨가되지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚과 유사하게 B 함량이 서서히 감소하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 B 함량은 각각 10, 6, 10 및 7 mg/kg으로 깔짚 종류에 따른 B 함량 차이는 크지 않았다.

혼합 미생물이 첨가된 PM:BC(8:2) 깔짚의 B 함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 감소하는 경향을 보였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 계분뇨 투입 40일 후에 B 함량은 각각 2 및 7 mg/kg으로 큰 차이가 나타나지 않았다.

Table. 4-13. 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 B 함량 변화.

Litter	깔짚 사용 기간 (day)						
	0	5	10	15	25	30	40
Rice husk	ND	ND	0.7	ND	ND	5.2	23.5
Peat moss	ND	ND	1.9	ND	ND	4.1	1.3
Biochar	248.6	107.4	71.6	61.1	36.2	36.3	20.3
PM:BC(8:2)	55.9	18.9	12.0	10.4	2.5	18.0	5.3
PM:BC(8:2)+B	45.9	26.2	19.1	8.1	13.5	12.4	9.9
PM:BC(8:2)+L	45.0	21.6	21.7	5.0	26.3	10.7	6.3
PM:BC(8:2)+S	29.5	22.3	17.3	11.0	20.6	13.0	9.9
PM:BC(8:2)+A	42.2	19.6	13.9	4.3	11.3	10.8	7.2
PM:BC(8:2)+BLS	28.6	17.0	31.8	4.9	15.0	7.2	2.3
PM:BC(8:2)+BLSA	25.6	26.7	22.4	7.6	12.6	4.5	7.1

단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 발아지수 변화는 Table 4-14에 나타내었다. 단일 및 혼합 깔짚의 발아지수는 사육 기간이 경과 함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 깔짚 상태의 모니터링이 종료되고 퇴비화 과정에서 기간이 경과 함에 따라 왕겨, 피트모스, 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 발아지수가 미량 증가하였다.

Table 4-14. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 발아지수(GI) 변화

Litter	GI during litter condition			GI during composting	
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day
Rice husk	168.77	102.82	41.21	42.90	46.03
Peat moss	97.10	77.14	45.53	46.78	50.72
Biochar	68.56	86.02	29.88	43.74	36.22
PM:BC(8:2)	149.70	130.73	42.04	45.8	54.8

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 발아지수 변화는 Table 4-15에 나타내었다. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 발아지수는 사육 기간이 경과 함에 따라 감소하는 경향을 보였으며 발아지수 70 이하로 미부숙으로 판정되었다. 퇴비화 과정 진행 중에 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 발아지수는 증가하는 경향을 보였다.

Table 4-15. 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 발아지수(GI) 변화

Litter	GI during litter condition			GI during composting	
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day
PM:BC(8:2)+B	63.93	135.71	63.46	49.94	58.97
PM:BC(8:2)+L	136.08	180.91	45.10	35.98	51.70
PM:BC(8:2)+S	75.61	126.58	46.47	41.03	55.66
PM:BC(8:2)+A	152.02	139.35	48.63	35.98	52.89

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 발아지수 변화는 Table 4-16에 나타내었다. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 발아지수는 사육 기간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 보였으며 발아지수 70 이하로 미부숙으로 판정되었다. PM:BC(8:2)+BLS 깔짚은 사육 기간 종료 시점에 발아지수가 64.17로 퇴비화 단계에서 빠르게 부숙 완료 판정을 받을 것으로 사료된다. 퇴비화 과정 진행 중에 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 발아지수는 증가하는 경향을 보였다.

Table 4-16. 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 발아지수(GI) 변화

Litter	GI during litter condition			GI during composting	
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day
PM:BC(8:2)+BLS	122.53	107.14	64.17	59.89	64.56
PM:BC(8:2)+BLSA	149.15	105.74	41.21	49.66	58.60

② 계분뇨 퇴비의 안정성 평가

계분뇨 퇴비의 안정성을 평가하기 위하여 실제 축사와 유사한 환경을 모사하여 깔짚 종류별 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 염산불용해물, 유해물질 (As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, Ni 및 Zn), 대장균, 살모넬라, 염분, NO₃-N, PO₄-P, SO₄-S 및 악취 발생량을 조사하였다. 안정성 평가 항목은 농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 고지되어있는 가축분 퇴비의 유해성분 항목에 준하여 선정하였으며, 이외에도 축사 주변 환경에 영향을 미칠 수 있는 항목을 추가적으로 선정하여 조사하였다.

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 염산불용해물 기준은 25% 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 염산불용해물 변화는 Table 4-17에서 보는 바와 같다. 사육 기간 및 퇴비화 기간 중 염산불용해물 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 염산불용해물은 각각 2.20~4.93, 1.01~1.45, 2.02~4.67 및 1.19~1.62로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 염산불용해물 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 염산불용해물에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-17. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 염산불용해물 변화

Litter	사육 기간 중 염산불용해물			퇴비화 기간 중 염산불용해물		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
Rice husk	4.93	3.52	2.34	2.20	2.45	2.61
Peat moss	1.01	1.02	1.16	1.23	1.45	1.32
Biochar	2.02	4.67	3.52	3.91	3.55	3.67
PM:BC(8:2)	1.43	1.24	1.19	1.29	1.48	1.62

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 염산불용해물 변화는 Table 4-18에서 보는 바와 같다. 사육 기간 및 퇴비화 기간 중 염산불용해물 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 염산불용해물은 각각 0.86~1.72, 1.05~1.93, 0.92~1.65 및 0.98~1.74로 확인되었다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 염산불용해물 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 염산불용해물에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-18. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 염산불용해물 변화

Litter	사육 기간 중 염산불용해물			퇴비화 기간 중 염산불용해물		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
PM:BC(8:2)+B	1.15	1.24	0.86	1.18	1.35	1.72
PM:BC(8:2)+L	1.62	1.05	1.59	1.78	1.59	1.93
PM:BC(8:2)+S	0.98	0.92	1.35	1.49	1.65	1.44
PM:BC(8:2)+A	0.98	1.06	1.44	1.69	1.52	1.74

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 염산불용해물 변화는 Table 4-19에서 보는 바와 같다. 사육 기간 및 퇴비화 기간 중 염산불용해물 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 염산불용해물은 각각 1.02~1.97 및 0.60~1.72로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 염산불용해물 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 염산불용해물에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-19. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 염산불용해물 변화

Litter	사육 기간 중 염산불용해물			퇴비화 기간 중 염산불용해물		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
PM:BC(8:2)+BLS	1.02	1.28	1.40	1.62	1.78	1.97
PM:BC(8:2)+BLSA	0.60	1.12	1.20	1.56	1.69	1.72

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 As 기준은 45 mg/kg 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 As 함량 변화는 Table 4-20에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 As 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 깔짚에서는 As가 검출되지 않았으며 PB:BC(8:2) 깔짚의 As 함량은 최대 0.09 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 As 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 As에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-20. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 As 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Peat moss	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Biochar	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PM:BC(8:2)	ND	0.09	ND	ND	ND	ND	ND

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 As 함량 변화는 Table 4-21에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 As 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B 및 PB:BC(8:2)+L 깔짚의 최대 As 함량은 각각 6.73 및 0.26 mg/kg이었으며, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚에서는 As가 검출되지 않았다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 As 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 As에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-21. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 As 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+B	ND	ND	ND	ND	6.73	ND	ND
PM:BC(8:2)+L	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	0.26
PM:BC(8:2)+S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PM:BC(8:2)+A	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 As 함량 변화는 Table 4-22에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 As 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 최대 As 함량은 각각 0.27 및 0.03 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 As 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 As에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-22. 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 As 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+BLS	0.27	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PM:BC(8:2)+BLSA	0.03	ND	ND	ND	ND	ND	ND

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 Cd 기준은 5 mg/kg 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cd 함량 변화는 Table 4-23에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cd 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 최대 Cd 함량은 각각 0.12, 1.05, 1.65 및 0.45 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 Cd 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cd에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-23. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cd 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	----- (mg/kg) -----						
Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	0.04	0.12
Peat moss	ND	1.05	0.08	ND	ND	0.12	0.58
Biochar	0.04	0.02	0.05	ND	ND	1.65	0.35
PM:BC(8:2)	0.07	ND	0.04	ND	ND	0.45	ND

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cd 함량 변화는 Table 4-24에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cd 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 최대 Cd 함량은 각각 0.43, 0.36, 1.59 및 0.15 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Cd 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cd에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-24. 단일 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cd 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	----- (mg/kg) -----						
PM:BC(8:2)+B	0.05	0.02	0.04	ND	0.05	ND	0.43
PM:BC(8:2)+L	0.06	ND	ND	ND	0.36	0.05	0.03
PM:BC(8:2)+S	0.03	ND	0.03	ND	ND	1.59	ND
PM:BC(8:2)+A	0.08	ND	0.08	0.10	0.14	0.09	0.15

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cd 함량 변화는 Table 4-25에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cd 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 최대 Cd 함량은 각각 0.63 및 0.53 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Cd 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cd에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-25. 혼합 미생물 첨가 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cd 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+BLS	0.15	0.02	0.08	0.00	0.54	0.06	0.63
PM:BC(8:2)+BLSA	0.07	0.01	0.01	0.00	0.11	0.53	0.34

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 Hg 기준은 2 mg/kg 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Hg 함량 변화는 Table 4-26에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Hg 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚에서 Hg가 검출되지 않았다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 Hg 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Hg에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-26. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Hg 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Peat moss	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Biochar	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PM:BC(8:2)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Hg 함량 변화는 Table 4-27에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Hg 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚에서 Hg가 검출되지 않았다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Hg 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Hg에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-27. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Hg 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+B	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PM:BC(8:2)+L	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PM:BC(8:2)+S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PM:BC(8:2)+A	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Hg 함량 변화는 Table 4-28에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Hg 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚에서 Hg가 검출되지 않았다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Hg 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Hg에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-28. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Hg 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+BLS	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PM:BC(8:2)+BLSA	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 Pb 기준은 130 mg/kg 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Pb 함량 변화는 Table 4-29에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Pb 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 최대 Pb 함량은 각각 12.42, 26.25, 12.25 및 12.70 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 Pb 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Pb에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-29. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Pb 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
Rice husk	ND	ND	0.63	ND	9.15	ND	12.42
Peat moss	0.83	12.95	1.86	ND	ND	ND	26.25
Biochar	0.46	ND	ND	ND	ND	ND	12.25
PM:BC(8:2)	1.53	1.35	0.81	ND	ND	4.34	12.70

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Pb 함량 변화는 Table 4-30에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Pb 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 최대 Pb 함량은 각각 13.50, 11.16, 32.53 및 26.98 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Pb 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Pb에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-30. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Pb 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+B	1.29	0.77	0.84	ND	ND	ND	13.50
PM:BC(8:2)+L	1.63	1.19	11.16	ND	ND	ND	0.65
PM:BC(8:2)+S	1.27	1.15	0.68	ND	ND	16.58	32.53
PM:BC(8:2)+A	2.12	0.12	0.75	ND	1.42	ND	26.98

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Pb 함량 변화는 Table 4-31에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Pb 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 최대 Pb 함량은 각각 21.12 및 34.41 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Pb 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Pb에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-31. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Pb 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+BLS	3.70	21.12	14.64	0.91	ND	3.64	2.78
PM:BC(8:2)+BLSA	0.85	0.57	1.07	34.41	ND	3.89	17.42

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 Cr 기준은 200 mg/kg 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cr 함량 변화는 Table 4-32에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cr 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 최대 Cr 함량은 각각 52.20, 23.62, 42.40 및 18.06 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 Cr 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cr에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-32. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cr 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
Rice husk	ND	17.16	ND	52.20	17.05	2.07	ND
Peat moss	ND	4.90	ND	23.62	17.99	12.48	ND
Biochar	3.03	0.37	ND	42.40	18.20	13.21	ND
PM:BC(8:2)	11.76	3.20	ND	18.06	17.92	1.78	ND

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cr 함량 변화는 Table 4-33에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cr 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 최대 Cr 함량은 각각 27.01, 22.54, 23.06 및 32.14 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Cr 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cr에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-33. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cr 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+B	1.64	8.34	1.41	27.01	1.86	1.37	1.93
PM:BC(8:2)+L	4.38	4.32	ND	22.54	7.22	3.70	11.94
PM:BC(8:2)+S	0.74	ND	ND	23.06	5.03	0.76	0.55
PM:BC(8:2)+A	0.72	ND	ND	16.74	4.28	32.14	2.12

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cr 함량 변화는 Table 4-34에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cr 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 최대 Cr 함량은 각각 44.83 및 30.25 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Cr 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cr에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-34. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cr 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+BLS	8.63	ND	10.33	17.75	44.83	2.61	ND
PM:BC(8:2)+BLSA	ND	1.22	3.84	23.99	2.06	4.52	30.25

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 Cu 기준은 360 mg/kg 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cu 함량 변화는 Table 4-35에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cu 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 최대 Cu 함량은 각각 208.0, 187.6, 212.4 및 258.9 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 Cu 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cu에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-35. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cu 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	----- (mg/kg) -----						
Rice husk	ND	124.15	148.37	139.63	208.00	181.75	182.06
Peat moss	ND	118.85	122.46	155.15	180.50	181.63	187.57
Biochar	7.14	105.87	124.47	156.91	172.06	145.79	212.39
PM:BC(8:2)	3.72	84.48	151.16	199.43	170.60	189.27	258.92

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cu 함량 변화는 Table 4-36에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cu 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 최대 Cu 함량은 각각 196.8, 186.0, 178.5 및 192.5 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Cu 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cu에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-36. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cu 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	----- (mg/kg) -----						
PM:BC(8:2)+B	1.92	117.29	113.67	142.49	196.80	180.56	179.64
PM:BC(8:2)+L	ND	106.86	149.33	132.11	179.14	187.54	186.03
PM:BC(8:2)+S	1.03	88.01	126.00	141.42	175.17	165.09	178.47
PM:BC(8:2)+A	ND	97.19	126.87	124.32	192.45	179.10	180.03

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Cu 함량 변화는 Table 4-37에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Cu 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 최대 Cu 함량은 각각 194.6 및 190.3 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Cu 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Cu에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-37. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Cu 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+BLS	4.40	113.64	125.52	140.02	154.59	189.98	194.64
PM:BC(8:2)+BLSA	0.01	94.55	110.67	140.29	183.70	190.33	183.66

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 Ni 기준은 45 mg/kg 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Ni 함량 변화는 Table 4-38에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Ni 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 최대 Ni 함량은 각각 15.81, 6.41, 4.09 및 2.92 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 Ni 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Ni에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-38. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Ni 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
Rice husk	ND	3.04	ND	15.81	ND	0.81	ND
Peat moss	0.20	ND	ND	2.30	2.68	6.41	ND
Biochar	ND	ND	ND	4.09	ND	0.94	3.27
PM:BC(8:2)	2.59	ND	ND	2.92	ND	ND	0.52

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Ni 함량 변화는 Table 4-39에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Ni 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 최대 Ni 함량은 각각 1.23, 12.53, 2.71 및 2.66 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Ni 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Ni에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-39. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Ni 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+B	ND	1.23	ND	ND	0.41	0.29	ND
PM:BC(8:2)+L	ND	ND	ND	1.92	1.11	ND	12.53
PM:BC(8:2)+S	ND	ND	0.61	2.71	1.49	ND	1.21
PM:BC(8:2)+A	ND	ND	0.74	ND	2.66	9.17	ND

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Ni 함량 변화는 Table 4-40에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Ni 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 최대 Ni 함량은 각각 23.24 및 4.09 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Ni 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Ni에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-40. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Ni 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
PM:BC(8:2)+BLS	3.72	ND	3.45	ND	23.24	ND	ND
PM:BC(8:2)+BLSA	ND	0.19	3.63	3.48	4.09	1.23	3.27

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 Zn 기준은 900 mg/kg 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Zn 함량 변화는 Table 4-41에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Zn 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 최대 Zn 함량은 각각 155.0, 160.1, 143.4 및 188.7 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 Zn 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Zn에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-41. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Zn 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	(mg/kg)						
Rice husk	12.84	78.46	130.74	115.93	155.02	155.01	146.16
Peat moss	ND	69.08	98.52	160.10	151.96	141.88	154.04
Biochar	1.38	55.17	106.96	127.06	143.42	137.62	124.99
PM:BC(8:2)	ND	57.39	121.62	180.37	147.48	160.10	188.74

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Zn 함량 변화는 Table 4-42에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Zn 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 최대 Zn 함량은 각각 177.5, 157.5, 147.9 및 183.9 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Zn 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Zn에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-42. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Zn 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	----- (mg/kg) -----						
PM:BC(8:2)+B	ND	126.30	90.40	135.56	162.76	177.53	137.21
PM:BC(8:2)+L	1.90	55.91	118.62	139.68	133.92	157.50	142.48
PM:BC(8:2)+S	ND	43.35	128.82	112.43	141.94	136.19	147.94
PM:BC(8:2)+A	90.47	52.63	119.10	98.34	161.82	183.85	134.57

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 Zn 함량 변화는 Table 4-43에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 Zn 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 최대 Zn 함량은 각각 163.8 및 145.2 mg/kg으로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 Zn 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 Zn에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-43. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 Zn 함량 변화

Litter	0 day	5 day	10 day	15 day	25 day	30 day	40 day
	----- (mg/kg) -----						
PM:BC(8:2)+BLS	121.50	74.07	104.08	132.49	150.87	152.68	163.78
PM:BC(8:2)+BLSA	2.35	50.75	84.54	119.78	143.05	137.50	145.21

퇴비의 병원성 미생물에 대한 안정성 평가를 위하여 대장균 및 살모넬라 검출 시험을 수행하였다. 깔짚에 계분뇨를 투입하고 40일 후에 샘플링한 퇴비와 퇴비화를 시작하고 10일 후에 샘플링한 퇴비를 이용하여 대장균 및 살모넬라 검출 시험을 수행한 결과, 모든 처리구에서 대장균 및 살모넬라가 검출되지 않았다 (Table 4-44 및 Fig 4-17~22).

Table 4-44. 깔짚 소재별 대장균 및 살모넬라 검출 시험 결과

Litter	대장균		살모넬라	
	계분뇨 투입 40일 후	퇴비화 시작 10일 후	계분뇨 투입 40일 후	퇴비화 시작 10일 후
Rice husk	불검출	불검출	불검출	불검출
Peat moss	불검출	불검출	불검출	불검출
Biochar	불검출	불검출	불검출	불검출
PM:BC(8:2)	불검출	불검출	불검출	불검출
PM:BC(8:2)+B	불검출	불검출	불검출	불검출
PM:BC(8:2)+L	불검출	불검출	불검출	불검출
PM:BC(8:2)+S	불검출	불검출	불검출	불검출
PM:BC(8:2)+A	불검출	불검출	불검출	불검출
PM:BC(8:2)+BLS	불검출	불검출	불검출	불검출
PM:BC(8:2)+BLSA	불검출	불검출	불검출	불검출

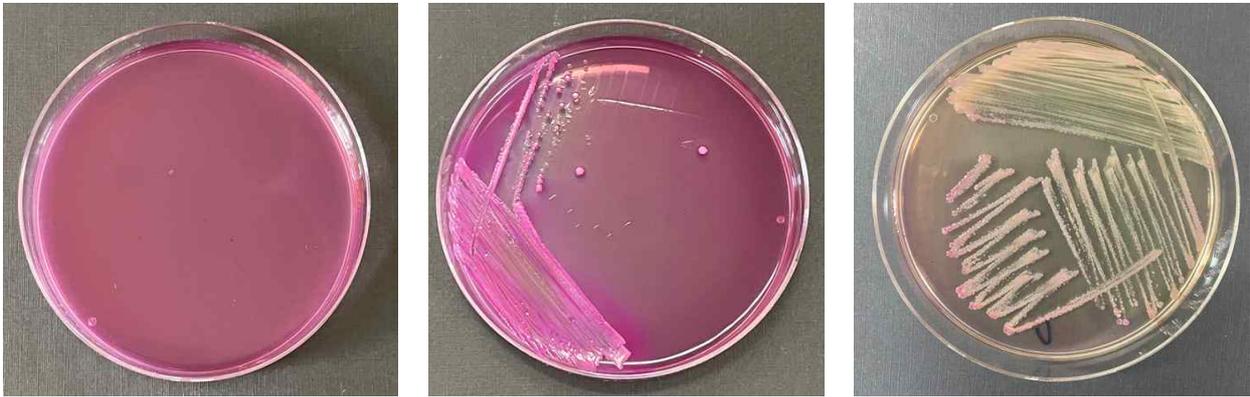


배양 전



배양 후

Fig. 4-17. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 대장균 증균배양 (mEC Broth).



배양 전

배양 후 (미검출 시)

배양 후 (검출 시)

Fig. 4-18. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 대장균 분리배양(MacConkey sorbitol Agar).

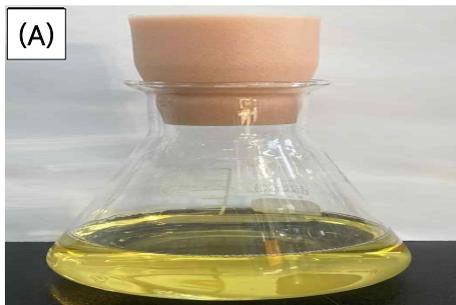


배양 전

배양 후 (미검출 시)

배양 후 (검출 시)

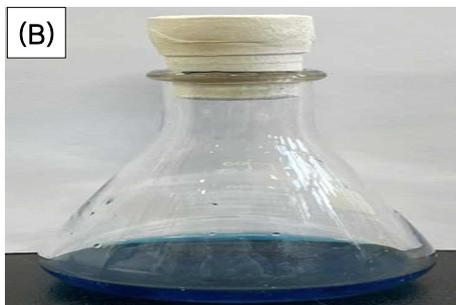
Fig. 4-19. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 대장균 확인시험(Eosine Methylene Blue Agar).



(A)



배양 후



(B)



배양 후

Fig. 4-20. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 살모넬라 증균배양(Pepton water(A), Rappaport-Vassiliadis broth(B)).

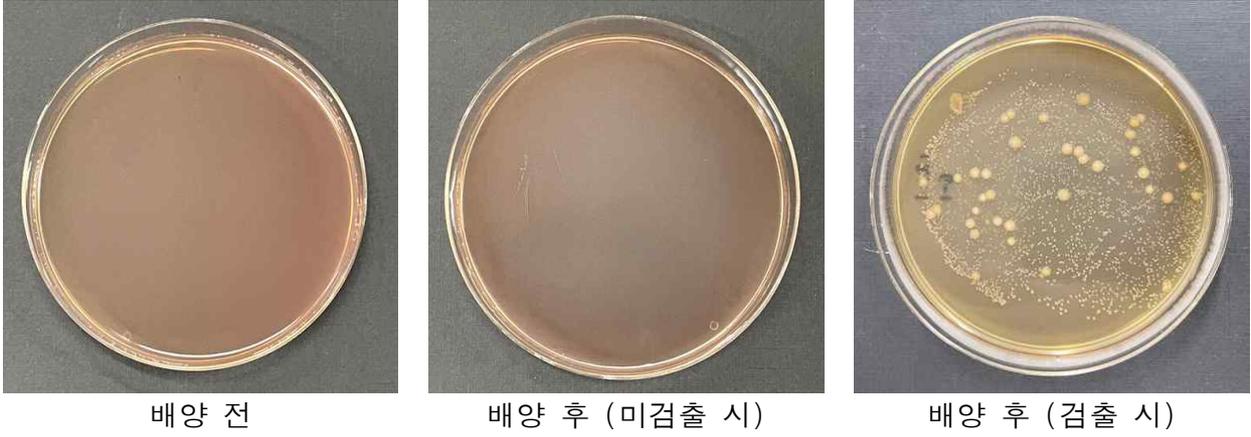


Fig. 4-21. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 살모넬라 분리배양(Desoxycholate Citrate Agar).

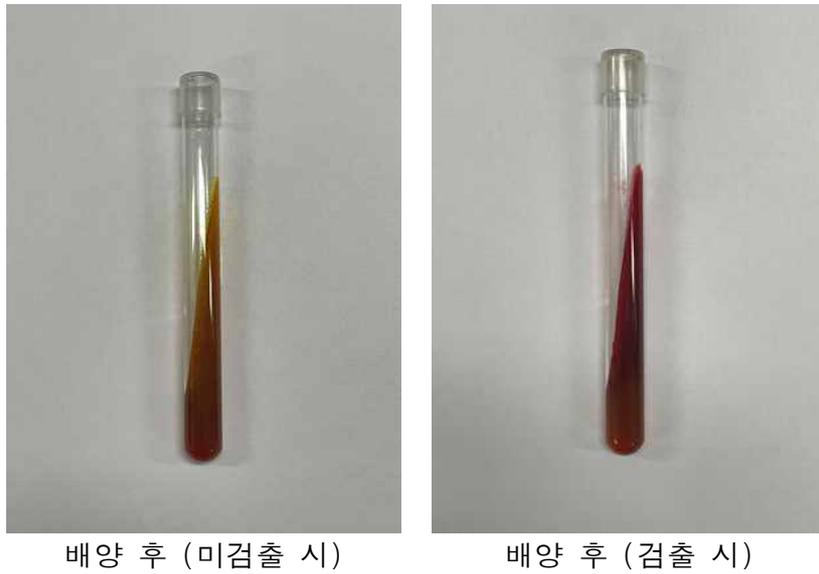


Fig. 4-22. 우분뇨 및 혼합 깔짚 퇴비의 살모넬라 확인시험(Triple Sugar Iron Agar(TSI 사면배지)).

농촌진흥청 고시 제 2021-29호 비료 공정규격 설정에 가축분 퇴비의 염분 기준은 2.0% 이하로 설정되어있다. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 염분 함량 변화는 Table 4-45에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 염분 함량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 최대 염분 함량은 각각 0.23, 0.21, 0.95 및 0.44%로 확인되었다. 이상의 단일 및 혼합 깔짚의 염분 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 염분에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-45 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 염분 함량 변화

Litter	5 day	10 day	15 day	20 day	25 day	30 day	40 day
	----- (%) -----						
Rice husk	0.16	0.13	0.17	0.23	0.18	0.17	0.19
Peat moss	0.13	0.09	0.16	0.17	0.21	0.15	0.16
Biochar	0.95	0.65	0.51	0.16	0.46	0.42	0.37
PM:BC(8:2)	0.20	0.22	0.24	0.44	0.19	0.36	0.19

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 염분 함량 변화는 Table 4-46에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 염분 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 최대 염분 함량은 각각 0.31, 0.34, 0.31 및 0.32%로 확인되었다. 이상의 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 염분 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 염분에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-46. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 염분 함량 변화

Litter	5 day	10 day	15 day	20 day	25 day	30 day	40 day
	----- (%) -----						
PM:BC(8:2)+B	0.31	0.24	0.26	0.27	0.31	0.23	0.24
PM:BC(8:2)+L	0.34	0.26	0.26	0.23	0.22	0.23	0.24
PM:BC(8:2)+S	0.31	0.24	0.26	0.25	0.23	0.24	0.21
PM:BC(8:2)+A	0.32	0.25	0.26	0.24	0.22	0.23	ND

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 따른 염분 함량 변화는 Table 4-47에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 염분 함량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 최대 염분 함량은 각각 0.20 및 0.33%로 확인되었다. 이상의 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 염분 수치는 농촌진흥청 비료 공정규격 설정에 고시된 기준값에 만족하기 때문에 염분에 대한 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 4-47. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간에 따른 염분 함량 변화

Litter	5 day	10 day	15 day	20 day	25 day	30 day	40 day
	----- (%) -----						
PM:BC(8:2)+BLS	0.13	0.18	0.17	0.20	0.18	0.18	ND
PM:BC(8:2)+BLSA	0.33	0.29	0.26	0.28	0.25	0.22	ND

단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 NO₃-N 침출량 변화는 Table 4-48에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 NO₃-N 침출량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 NO₃-N 침출량은 144 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 NO₃-N 침출량 변화의 경우, 단일 및 혼합 깔짚의 NO₃-N 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 퇴비화 시작 10일 경과 후 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 NO₃-N 침출량은 각각 265, 2105, 532 및 1239 mg/kg 검출되었다.

Table 4-48. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 NO₃-N 침출량

Litter	사육 기간 중 NO ₃ -N (mg/kg)			퇴비화 기간 중 NO ₃ -N (mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
Rice husk	ND	ND	ND	189	139	265
Peat moss	ND	109	ND	397	1699	2105
Biochar	35	ND	ND	ND	225	532
PM:BC(8:2)	ND	144	97	1016	815	1239

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 NO₃-N 침출량 변화는 Table 4-49에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 NO₃-N 침출량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 NO₃-N 침출량은 347 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 NO₃-N 침출량 변화의 경우, 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 NO₃-N 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 퇴비화 시작 10일 경과 후 PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 NO₃-N 침출량은 각각 1343, 1562, 1448 및 1645 mg/kg 검출되었다.

Table 4-49. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 NO₃-N 침출량

Litter	사육 기간 중 NO ₃ -N (mg/kg)			퇴비화 기간 중 NO ₃ -N (mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
PM:BC(8:2)+B	7	213	213	101	1151	1343
PM:BC(8:2)+L	ND	ND	341	195	1035	1562
PM:BC(8:2)+S	ND	ND	284	164	1192	1448
PM:BC(8:2)+A	ND	415	347	403	1280	1645

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 NO₃-N 침출량 변화는 Table 4-50에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 NO₃-N 침출량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 NO₃-N 침출량은 387 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 NO₃-N 침출량 변화의 경우, 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 NO₃-N 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 퇴비화 시작 10일 경과

후 PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 NO₃-N 침출량은 각각 2853 및 3015 mg/kg 검출되었다.

Table 4-50. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 NO₃-N 침출량

Litter	사육 기간 중 NO ₃ -N (mg/kg)			퇴비화 기간 중 NO ₃ -N (mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
PM:BC(8:2)+BLS	ND	121	179	422	2066	2853
PM:BC(8:2)+BLSA	ND	10	387	458	2164	3015

퇴비화 시작 10일 이후에도 지속적으로 NO₃-N 침출량이 증가할 경우 퇴비사에서 퇴비 침출수가 유출되지 않도록 시스템적인 보완이 필요할 것으로 판단된다.

단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 SO₄-S 침출량 변화는 Table 4-51에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 SO₄-S 침출량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 SO₄-S 침출량은 3892 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 SO₄-S 침출량 변화의 경우, 단일 및 혼합 깔짚의 SO₄-S 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 퇴비화 시작 10일 경과 후 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 SO₄-S 침출량은 각각 8537, 7855, 8132 및 7108 mg/kg 검출되었다.

Table 4-51. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 SO₄-S 침출량

Litter	사육 기간 중 SO ₄ -S (mg/kg)			퇴비화 기간 중 SO ₄ -S (mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
Rice husk	2592	3231	3401	3676	7678	8537
Peat moss	2625	3369	3892	4637	7154	7855
Biochar	3083	3410	2991	2647	7540	8132
PM:BC(8:2)	2107	3405	3636	4035	6246	7108

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 SO₄-S 침출량 변화는 Table 4-52에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 SO₄-S 침출량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 SO₄-S 침출량은 4052 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 SO₄-S 침출량 변화의 경우, 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 SO₄-S 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 퇴비화 시작 10일 경과 후 PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 SO₄-S 침출량은 각각 7382, 7209, 8231 및 7958 mg/kg 검출되었다.

Table 4-52. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 SO₄-S 침출량

Litter	사육 기간 중 SO ₄ -S (mg/kg)			퇴비화 기간 중 SO ₄ -S (mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
PM:BC(8:2)+B	2147	3421	3813	5181	6996	7382
PM:BC(8:2)+L	2324	3209	3714	8004	6868	7209
PM:BC(8:2)+S	2051	3401	3889	7240	7813	8231
PM:BC(8:2)+A	2214	3238	4052	7730	7313	7958

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 SO₄-S 침출량 변화는 Table 4-53에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 SO₄-S 침출량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 SO₄-S 침출량은 4125 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 SO₄-S 침출량 변화의 경우, 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 SO₄-S 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 퇴비화 시작 10일 경과 후 PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 SO₄-S 침출량은 각각 8962 및 8753 mg/kg 검출되었다.

Table 4-53. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 SO₄-S 침출량

Litter	사육 기간 중 SO ₄ -S (mg/kg)			퇴비화 기간 중 SO ₄ -S (mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
PM:BC(8:2)+BLS	2234	3598	4125	8321	8767	8962
PM:BC(8:2)+BLSA	2534	3514	3657	6335	8086	8753

퇴비화 시작 10일 이후에도 지속적으로 SO₄-S 침출량이 증가할 경우 퇴비사에서 퇴비 침출수가 유출되지 않도록 시스템적인 보완이 필요할 것으로 사료된다.

단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 PO₄-P 침출량 변화는 Table 4-54에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 PO₄-P 침출량 변화를 확인한 결과, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 PO₄-P 침출량은 4924 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 PO₄-P 침출량 변화의 경우, 왕겨 및 바이오차 깔짚의 PO₄-P 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 증가하였고 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 PO₄-P 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 감소하였다가 증가하는 경향을 보였다. 퇴비화 시작 10일 경과 후 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PB:BC(8:2) 깔짚의 PO₄-P 침출량은 각각 5583, 4851, 5236 및 5689 mg/kg 검출되었다.

Table 4-54. 단일 및 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 PO₄-P 침출량

Litter	사육 기간 중 PO ₄ -P (mg/kg)			퇴비화 기간 중 PO ₄ -P(mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
Rice husk	3022	4012	3613	3559	5392	5583
Peat moss	3079	4004	4924	5511	4303	4851
Biochar	2131	2598	3330	3425	4948	5236
PM:BC(8:2)	2654	3905	4792	9180	5059	5689

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 PO₄-P 침출량 변화는 Table 4-55에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 PO₄-P 침출량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 PO₄-P 침출량은 5124 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 PO₄-P 침출량 변화의 경우, PB:BC(8:2)+B 깔짚의 PO₄-P 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 증가하였고 PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 PO₄-P 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 감소하였다가 증가하는 경향을 보았다. 퇴비화 시작 10일 경과 후 PB:BC(8:2)+B, PB:BC(8:2)+L, PB:BC(8:2)+S 및 PB:BC(8:2)+A 깔짚의 PO₄-P 침출량은 각각 5327, 5944, 4876 및 5003 mg/kg 검출되었다.

Table 4-55. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 PO₄-P 침출량

Litter	사육 기간 중 PO ₄ -P (mg/kg)			퇴비화 기간 중 PO ₄ -P(mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
PM:BC(8:2)+B	2815	3947	5010	4672	5269	5327
PM:BC(8:2)+L	2672	3774	5032	8161	4943	5944
PM:BC(8:2)+S	2236	3680	5124	7985	4121	4876
PM:BC(8:2)+A	2719	4904	4655	8792	4398	5003

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간 따른 PO₄-P 침출량 변화는 Table 4-56에서 보는 바와 같다. 사육 기간 중 PO₄-P 침출량 변화를 확인한 결과, PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 PO₄-P 침출량은 5116 mg/kg 이하로 검출되었다. 퇴비화 기간 중 PO₄-P 침출량 변화의 경우, 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 PO₄-P 침출량은 퇴비화 기간이 경과 함에 따라 감소하였다가 증가하는 경향을 보였으며, 퇴비화 시작 10일 경과 후 PB:BC(8:2)+BLS 및 PB:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 PO₄-P 침출량은 각각 6075 및 5187 mg/kg 검출되었다.

Table 4-56. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 사육 기간 및 퇴비화 기간에 따른 PO₄-P 침출량

Litter	사육 기간 중 PO ₄ -P (mg/kg)			퇴비화 기간 중 PO ₄ -P(mg/kg)		
	5 day	20 day	40 day	0 day	5 day	10 day
PM:BC(8:2)+BLS	4809	4286	5116	8838	5264	6075
PM:BC(8:2)+BLSA	2657	3798	4760	4896	4525	5187

퇴비화 시작 10일 이후에도 지속적으로 PO₄-P 침출량이 증가할 경우 퇴비사에서 퇴비 침출수가 유출되지 않도록 시스템적인 보완이 필요할 것으로 사료된다.

③ 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 계사 내 악취 발생 특성 평가

깔짚 소재별 악취 발생 특성을 평가하기 위하여 계사와 유사한 환경을 조성하고 계분뇨를 매일 일정량 투입하였으며, 계분뇨 투입 4일, 12일, 17일, 24일, 36일 및 40일 후에 악취 샘플을 채취하여 분석하였다. 악취 성분은 환경부령으로 고시된 22종의 지정악취물질로 선정하였으며, 악취의 성분별 기여도를 고려하기 위하여 악취 성분 각각의 발생 농도에 사람이 감지할 수 있는 최저 농도인 악취 성분별 최소감지농도를 나누어 Odor Unit으로 환산된 값을 사용하였다.

단일 및 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 4일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-23에서 보는 바와 같다. 계분뇨 투입 4일 후 가장 많이 발생된 악취는 hydrogen sulfide로 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚에서 Odor Unit 값이 각각 1071925, 6605, 73325 및 77로 검출되었으며, PM:BC(8:2) 깔짚을 적용하였을 때 hydrogen sulfide 저감 효율이 가장 뛰어났다. Hydrogen sulfide 외에도 대량 발생한 악취 성분은 dimethyl sulfide, butanoic acid, butanal, trimethylamine 및 ammonia 등이 있었으며, VOCs는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 4일 후 대량 발생하였던 악취인 Ammonia 및 Sulfur compounds에 대한 악취 저감 효율은 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚이 뛰어났으며, PM:BC(8:2) 깔짚은 VOCs에 대한 저감 능력도 뛰어난 것으로 확인되었다.

계분뇨 투입 4일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 99.20, 93.01 및 99.80%로 세 깔짚 모두 90% 이상의 뛰어난 악취 저감 효율을 보였으며, 특히 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율이 가장 뛰어났다.

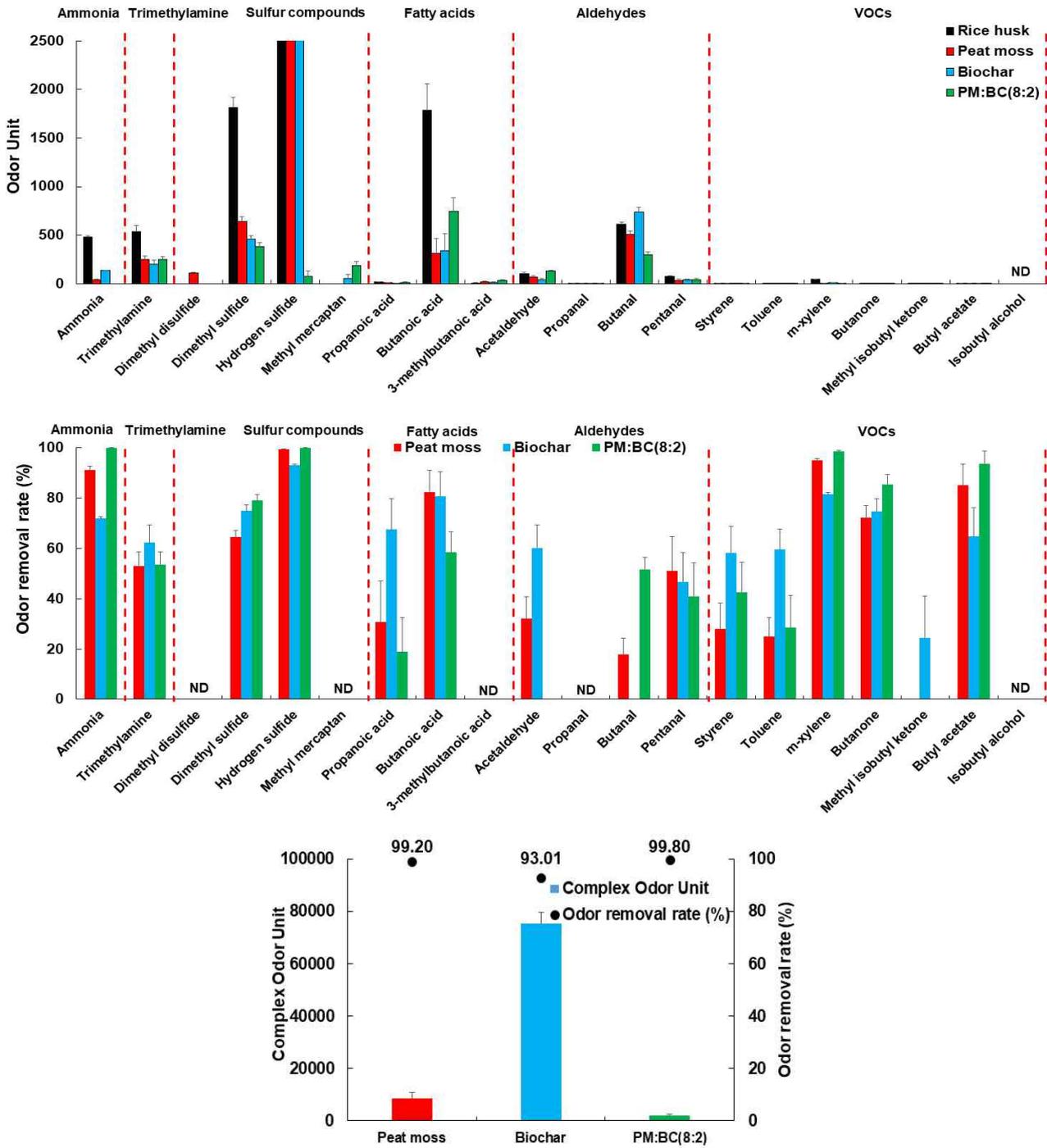


Fig. 4-23. 단일 및 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 4일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

단일 및 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 12일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-24에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 12일 후 hydrogen sulfide가 가장 많이 발생되었으며, 왕겨, 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚에서 발생된 hydrogen sulfide의 Odor Unit 값이 각각 596240, 123640, 177640 및 72440으로 검출되었다. Hydrogen sulfide 외에도 대량 발생한 악취 성분은 dimethyl sulfide, butanoic acid, butanal, trimethylamine 및 ammonia 등이 있었으며, VOCs는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 12일 후 대량 발생되었던 악취인 Ammonia 및 Sulfur compounds에 대한 악취

저감 효율은 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚이 뛰어났으며, Fatty acids에 대한 악취 저감 효율은 바이오차가 가장 뛰어났다.

계분뇨 투입 12일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 79.3, 80.21 및 87.67%로 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율이 가장 뛰어났지만, 계분뇨 투입 후 4일의 악취 저감 효율과 비교하였을 때 12일 후에 악취 저감 효율이 다소 감소하는 것을 확인하였다.

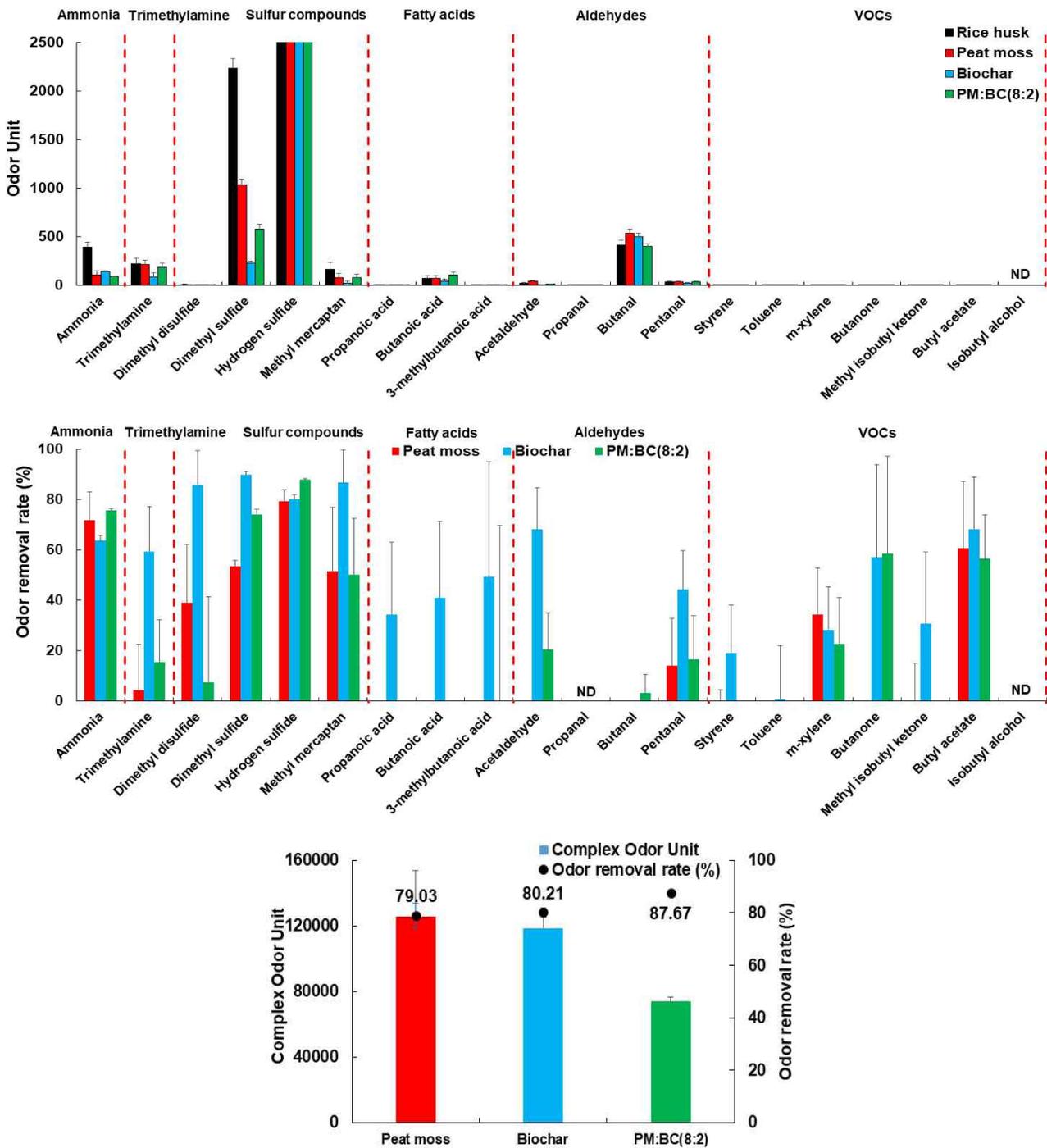


Fig. 4-24. 단일 및 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 12일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

단일 및 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 17일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-25에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 17일 후 악취 발생 특성은 계분뇨 투입 4일 및 12일 후와 유사하게 hydrogen sulfide가 가장 많이 발생되었으며, 왕겨, 피트모스, 및 바이오차 깔짚에서 발생된 hydrogen sulfide의 Odor Unit 값이 각각 479584, 277584 및 8024이었으며 PM:BC(8:2) 깔짚에서는 hydrogen sulfide가 발생되지 않았다. Hydrogen sulfide 외에도 대량 발생한 악취 성분은 dimethyl sulfide, butanoic acid, butanal, trimethylamine 및 ammonia 등이 있었으며, VOCs 는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 17일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 42.30, 98.18 및 99.38%로 계분뇨 투입 17일 후에 피트모스의 악취 저감 능력이 현저히 감소되었다. 또한 계분뇨 투입 17일 후 바이오차 깔짚의 악취 저감 능력이 급격히 상승하여 98.18%의 악취를 저감하였다.

단일 및 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 24일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-26에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 24일 후 hydrogen sulfide는 거의 발생하지 않았으며, dimethyl sulfide의 발생량이 증가하였다. 또한 계분뇨 투입 17일까지 발생하던 ammonia 및 trimethylamine은 검출되지 않고, methyl mercaptan, butanoic acid 및 butanal의 발생량이 증가하였다.

계분뇨 투입 24일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 계분뇨 투입 24일 후의 총 악취 발생량은 계분뇨 투입 17일까지의 악취 발생량에 비해 현저히 감소되었다. 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚에 대한 악취 저감 효율은 각각 65.28, 80.01 및 73.13%로 계분뇨 투입 24일 후부터 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 능력이 대폭 감소하였다.

단일 및 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 36일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-27에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 36일 후 hydrogen sulfide 및 methyl mercaptan은 거의 발생하지 않았으며, ammonia, trimethylamine 및 acetaldehyde는 검출되지 않았다. 반면에 바이오차 깔짚의 dimethyl sulfide 성분의 발생량이 증가하였다.

계분뇨 투입 36일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. 바이오차 깔짚에서 발생된 총 Odor Unit은 왕겨 깔짚에서 발생된 총 Odor Unit보다 높아 바이오차 깔짚의 악취 저감 효율을 산정할 수 없었다. 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚에 대한 악취 저감 효율은 각각 12.17 및 24.38%로 깔짚이 보유하고 있던 악취 저감 능력이 크게 감소되었다.

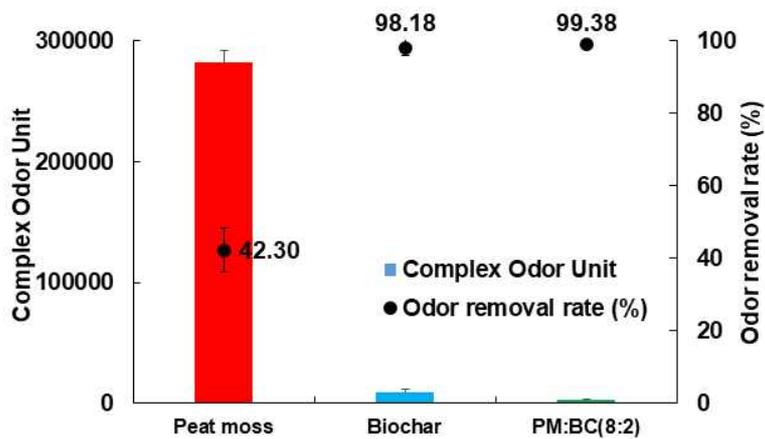
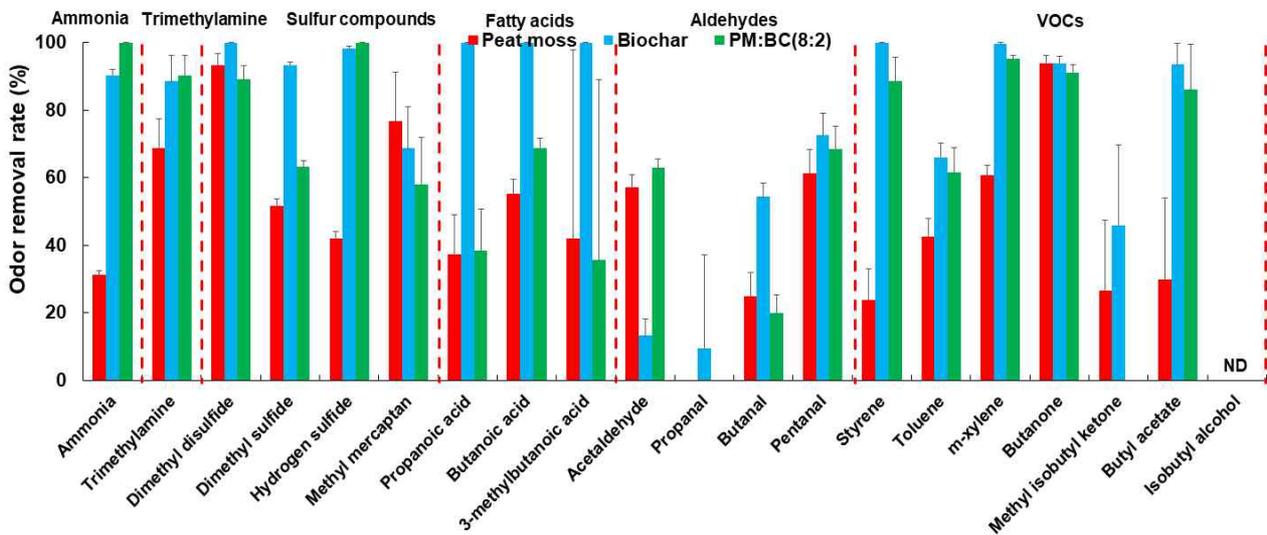
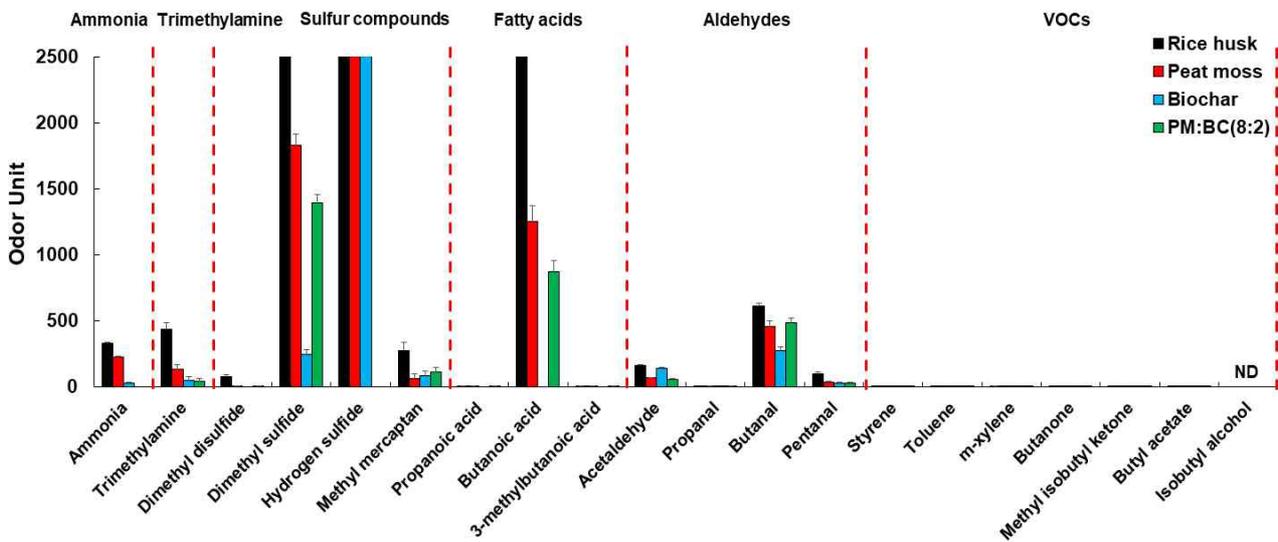


Fig. 4-25. 단일 및 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 17일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

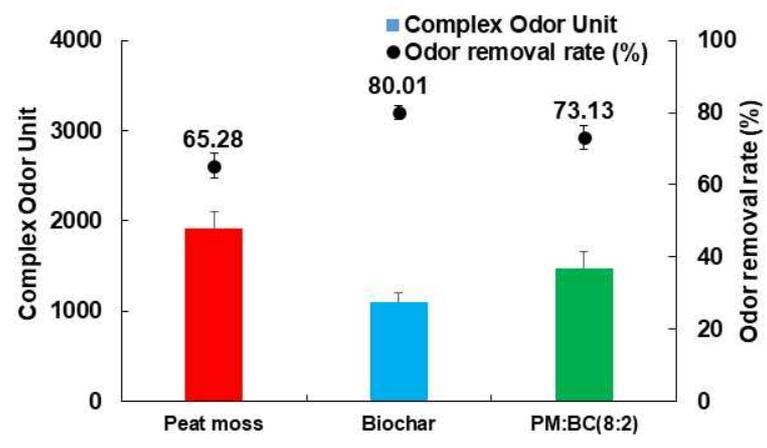
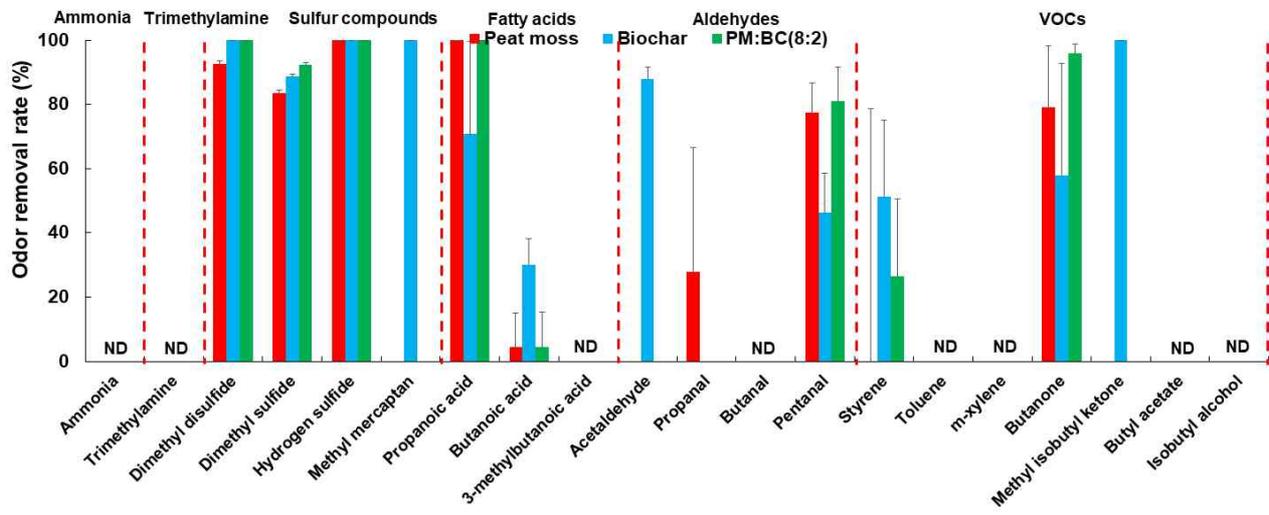
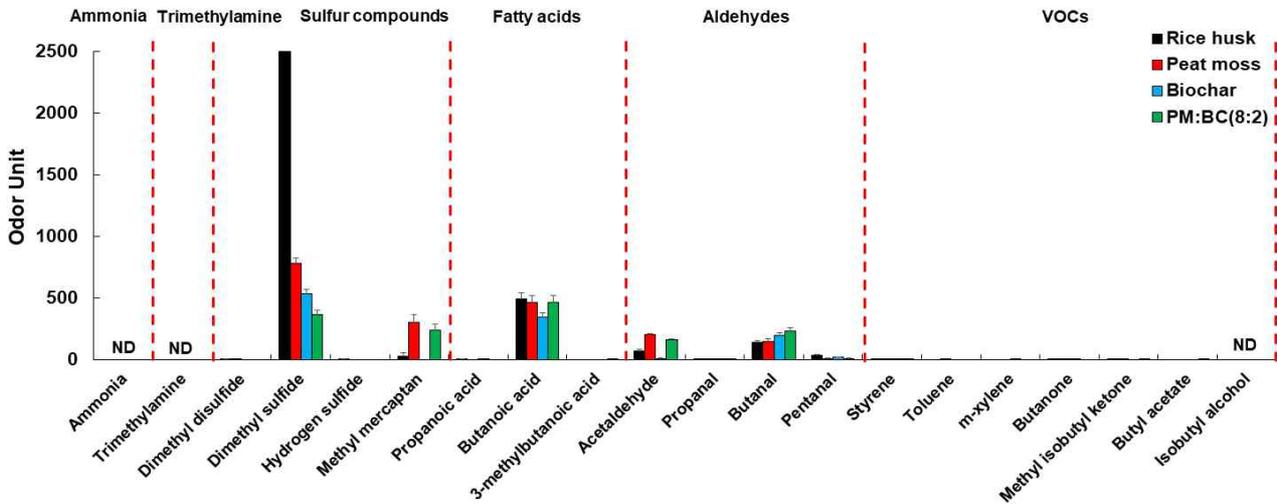


Fig. 4-26. 단일 및 혼합 깔짚 사용 시 계분노 투입 24일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

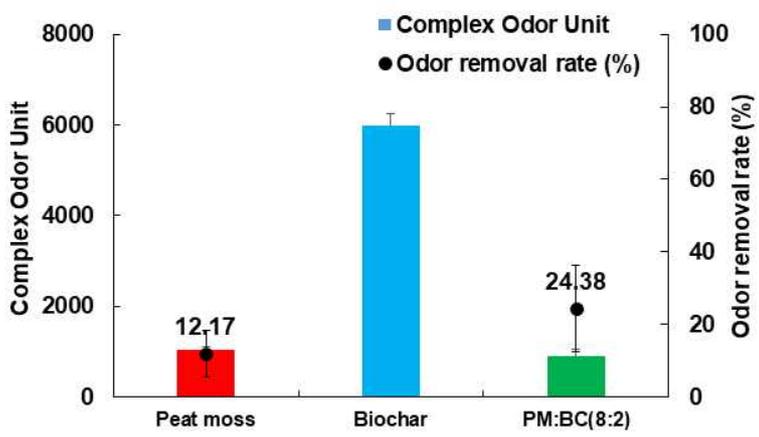
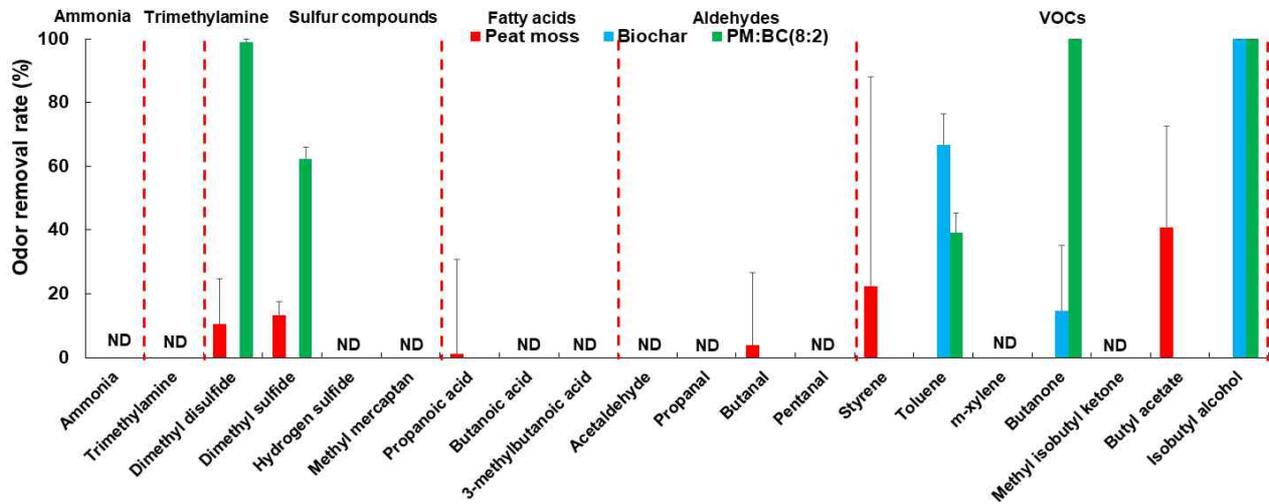
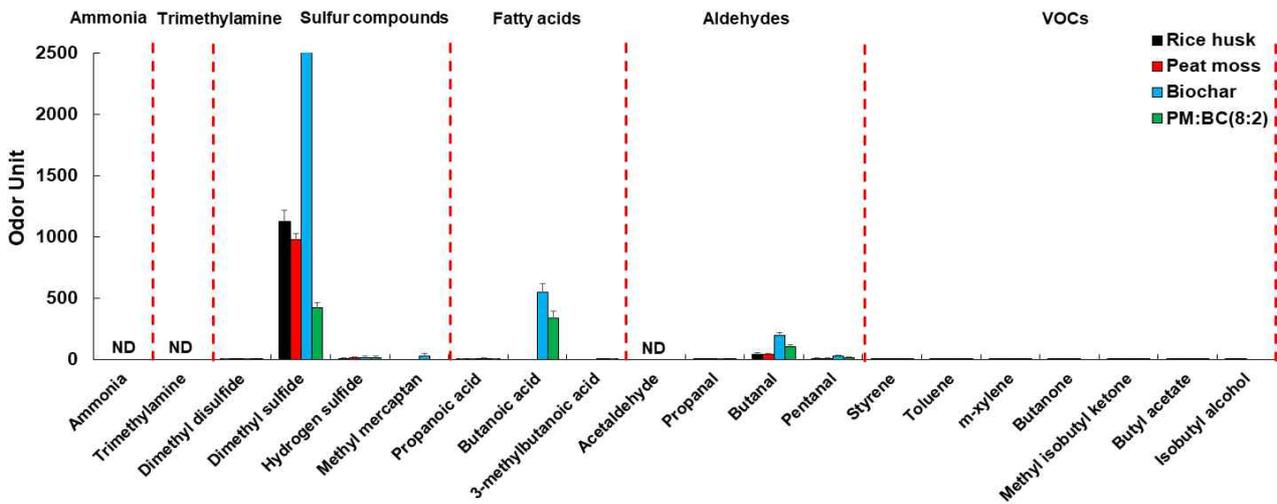


Fig. 4-27. 단일 및 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 36일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

단일 및 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 40일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-28에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 40일 후 왕겨 깔짚에서 dimethyl sulfide 및 butanoic acid가 대량 발생하였으나 피트모스 및 PM:BC(8:2) 깔짚에서는 dimethyl sulfide 및 butanoic acid의 발생량은 적었고, 바이오차 깔짚에서 dimethyl sulfide가 대량 발생되었다.

계분뇨 투입 40일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. 왕겨 깔짚에서 dimethyl sulfide가 대량 발생하였지만 그에 비해 악취 발생량이 적었던 피트모스, 바이오차 및 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율이 각각 96.68, 88.80 및 98.87%로 확인되었다.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 4일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-29에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 4일 후 hydrogen sulfide, butanal, dimethyl sulfide 등의 악취가 주로 발생되었다. ammonia, trimethylamine, fatty acids 및 VOCs는 거의 발생하지 않았으며 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚은 전반적으로 악취 발생량이 적었다.

계분뇨 투입 4일 후 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 성분별 악취 저감 효율은 첨가된 미생물 종류와 상관없이 유사하게 나타났다.

계분뇨 투입 4일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 99.53, 99.91, 99.84 및 99.79%로 모든 깔짚에서 99% 이상의 뛰어난 악취 저감 효율을 보였다.

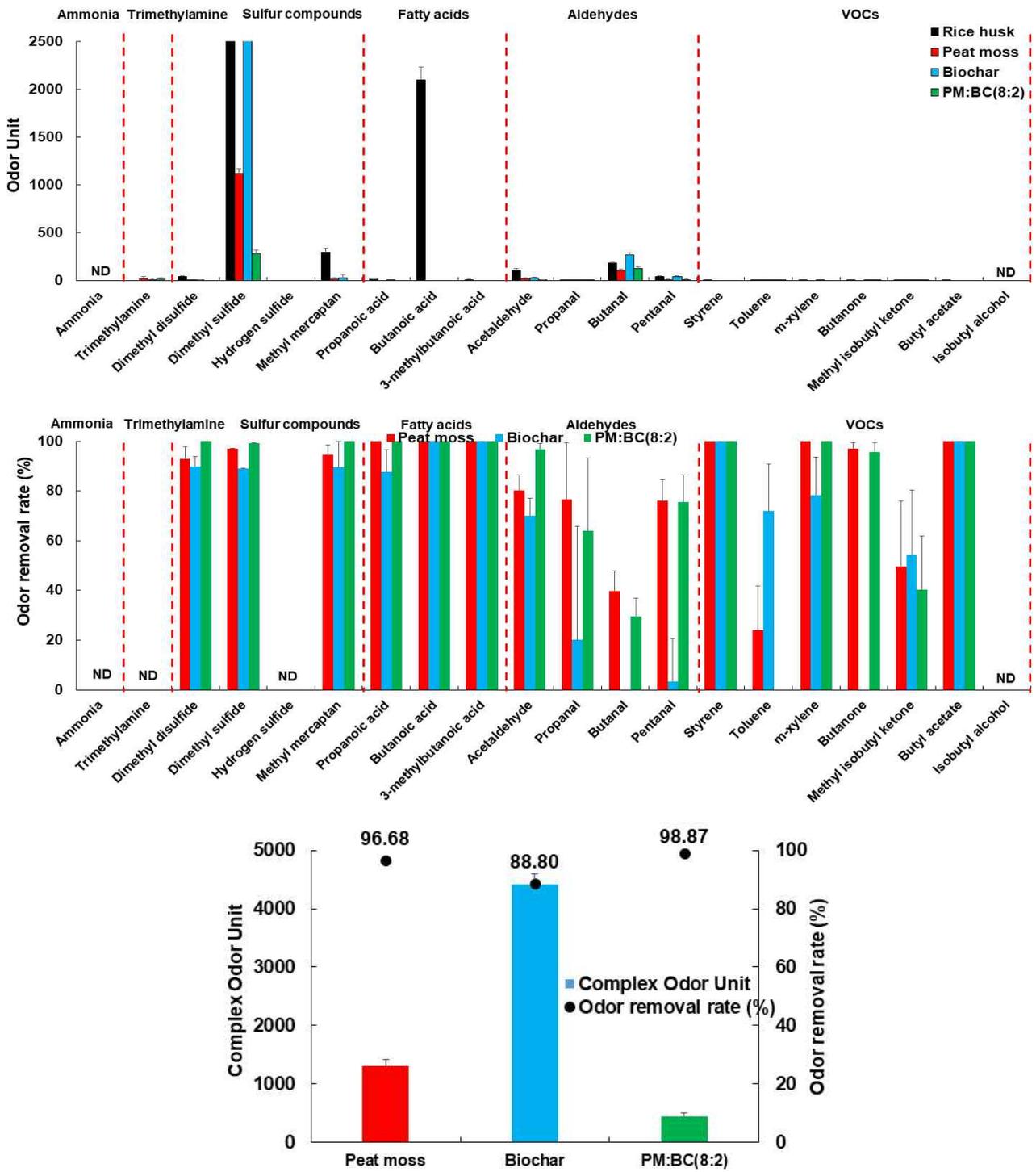


Fig. 4-28. 단일 및 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

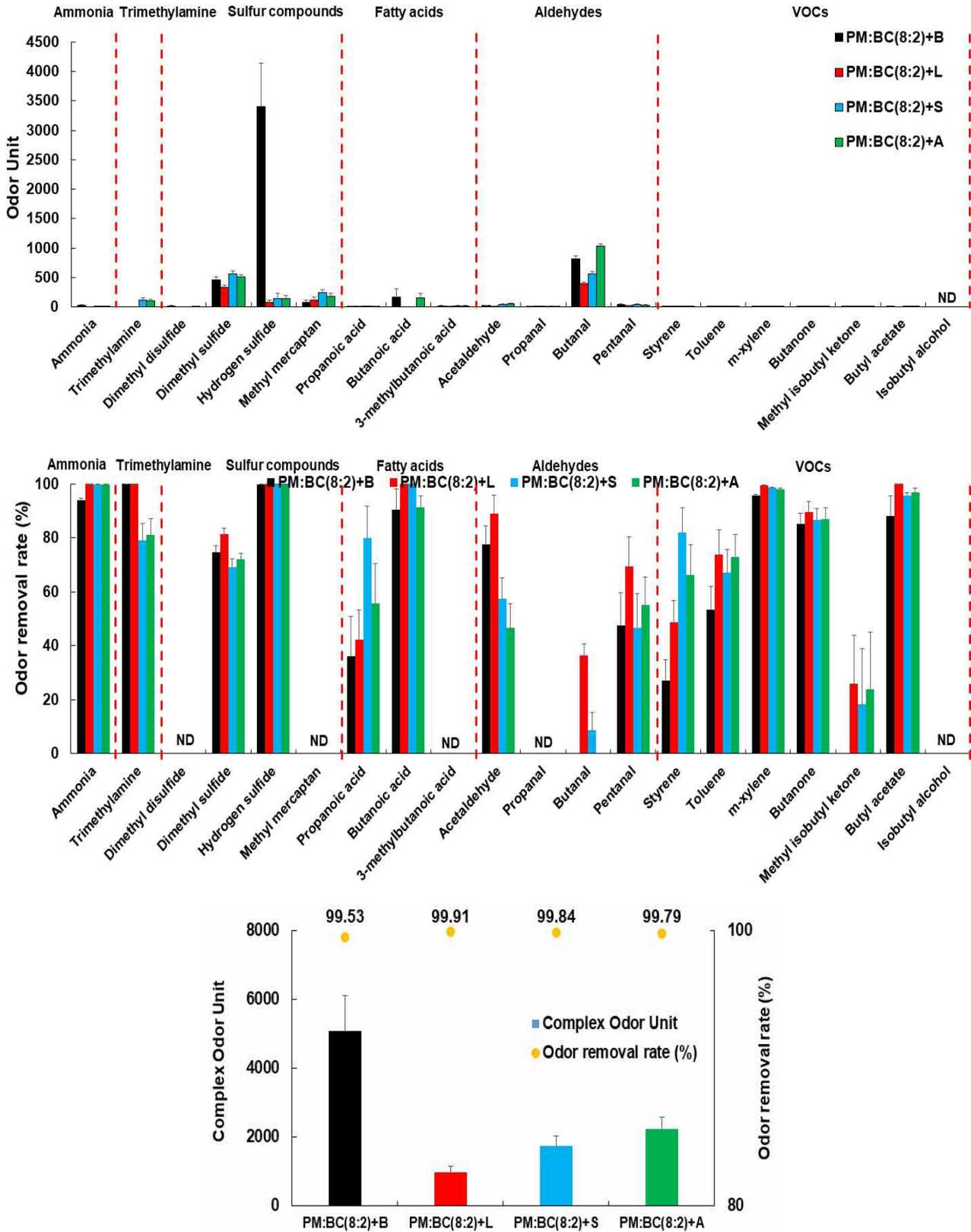


Fig. 4-29. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 4일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 12일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-30에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 12일 후 hydrogen sulfide의 발생량이 계분뇨 투입 4일 후에 비해 급격하게 증가하였으며, butanal, dimethyl sulfide 등의 악취가 주로 발생되었다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 Hydrogen sulfide의 Odor Unit 값은 각각 119640, 173440, 126240 및 154840이었으며, ammonia, trimethylamine, fatty acids 및 VOCs는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 12일 후 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 성분별 악취 저감 효율은 첨가된 미생물 종류와 상관없이 유사하게 나타났으며, Aldehydes 성분에 대한 저감 효율이 매우 낮았다.

계분뇨 투입 12일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 79.65, 70.84, 78.52 및 73.65%로 계분뇨 투입 4일 후의 악취 저감 효율에 비해 악취 저감 효율이 감소하였다.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 17일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-31에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 17일 후 PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚에서 hydrogen sulfide가 대량 발생되었으며 Odor Unit 값은 각각 107384 및 61240이었다. 또한 계분뇨 투입 12일까지 발생되지 않았던 Butanoic acid 및 Acetaldehyde가 발생되었으며, ammonia, trimethylamine 및 VOCs는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 17일 후 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 Fatty acids 및 Aldehydes에 대한 악취 저감 효율은 PM:BC(8:2)+L 깔짚이 높게 나타났다.

계분뇨 투입 17일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 98.76, 99.20, 76.80 및 97.33%로 PM:BC(8:2)+S 깔짚을 제외한 세 깔짚에서 뛰어난 악취 저감 효율을 확인하였으며, PM:BC(8:2)+S 깔짚의 악취 저감 효율이 낮은 것은 hydrogen sulfide 발생량이 증가했기 때문으로 판단된다.

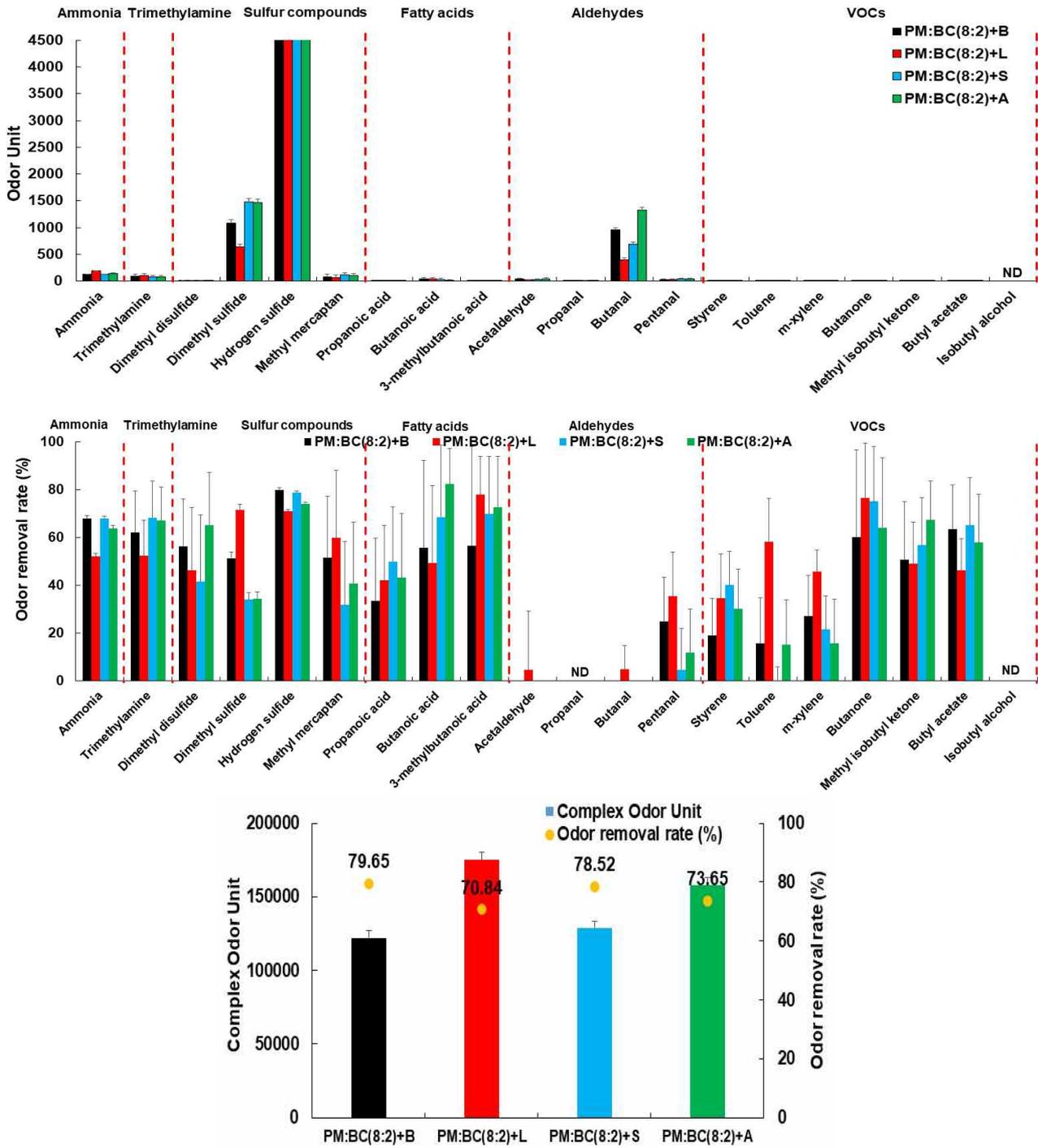


Fig. 4-30. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 12일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

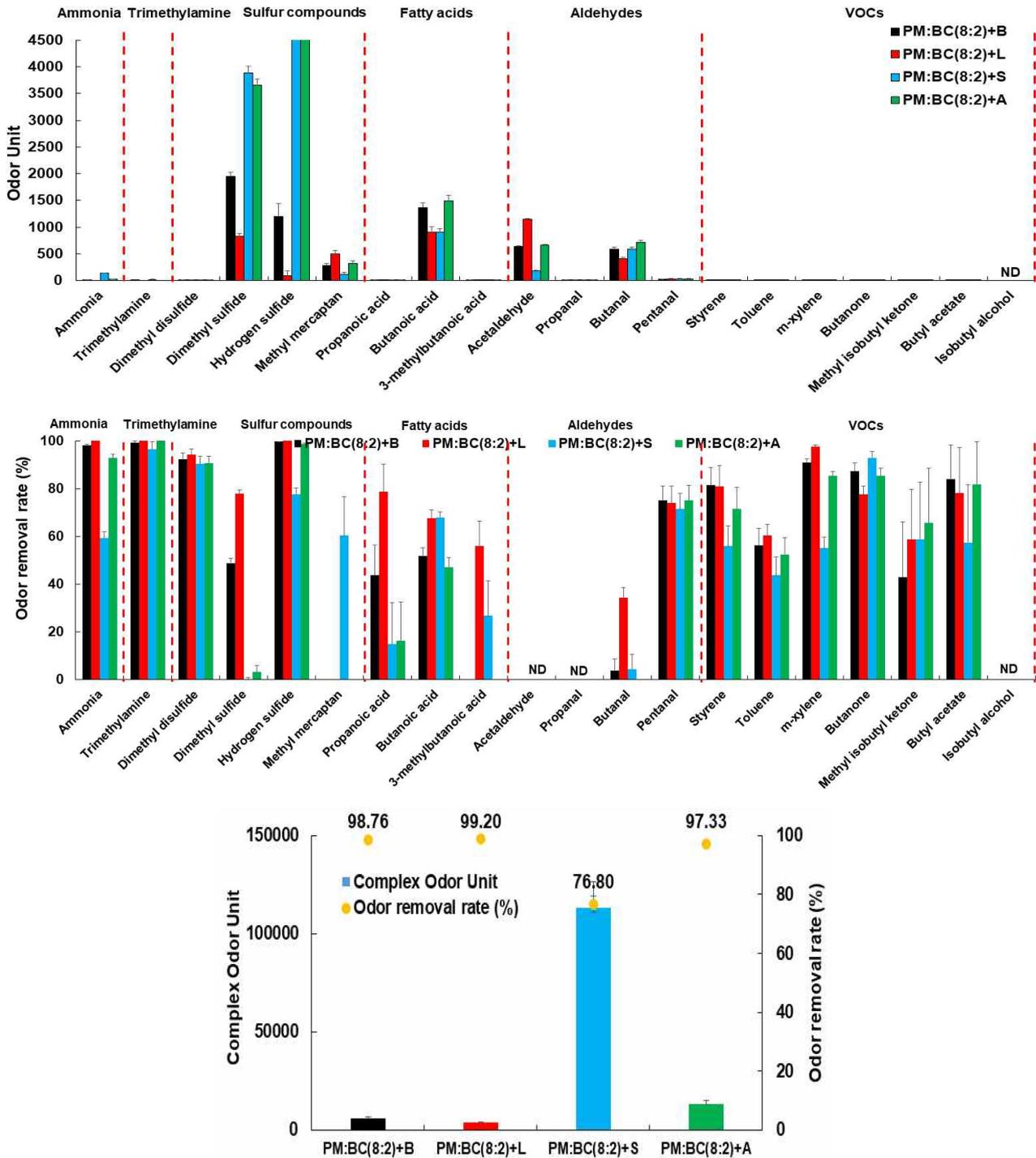


Fig. 4-31. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 17일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 24일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-32에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 24일 후 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚에서 발생된 악취 성분은 dimethyl sulfide, methyl mercaptan, butanoic acid, acetaldehyde, butanal 등이 있으며, ammonia, trimethylamine, hydrogen sulfide 및 VOCs는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 24일 후 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 성분별 악취 저감 효율은 첨가된 미생물 종류와 상관없이 유사하였으며, PM:BC(8:2)+L 깔짚은 aldehydes, butanal 및 butanone 성분에 대한 악취 저감 능력이 뛰어났다.

계분뇨 투입 24일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 65.61, 79.48, 61.19 및 66.02%로 모든 깔짚의 악취 저감 효율이 감소하였다.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 36일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-33에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 36일 후 Sulfur compounds, Fatty acids 및 Aldehydes가 주로 발생했으며 PM:BC(8:2)+S 깔짚의 악취 발생량이 다른 깔짚에 비해 높은 것을 확인하였다. 계분뇨 투입 직후 대량 발생했던 hydrogen sulfide는 계분뇨 투입 24일 이후부터는 거의 발생하지 않았다. ammonia, trimethylamine 및 acetaldehyde는 검출되지 않았다. 반면에 바이오차 깔짚의 dimethyl sulfide 성분의 발생량이 증가하였다.

계분뇨 투입 36일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+S 깔짚에서 발생된 총 Odor Unit은 왕겨 깔짚에서 발생된 총 Odor Unit보다 높아 PM:BC(8:2)+S 깔짚의 악취 저감 효율을 산정할 수 없었다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚에 대한 악취 저감 효율은 각각 32.86, 12.12 및 0.10%로 계분뇨 투입 36일 후부터는 왕겨 깔짚에서도 악취 발생이 많지 않아 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 저감 효율이 감소된 것으로 판단된다.

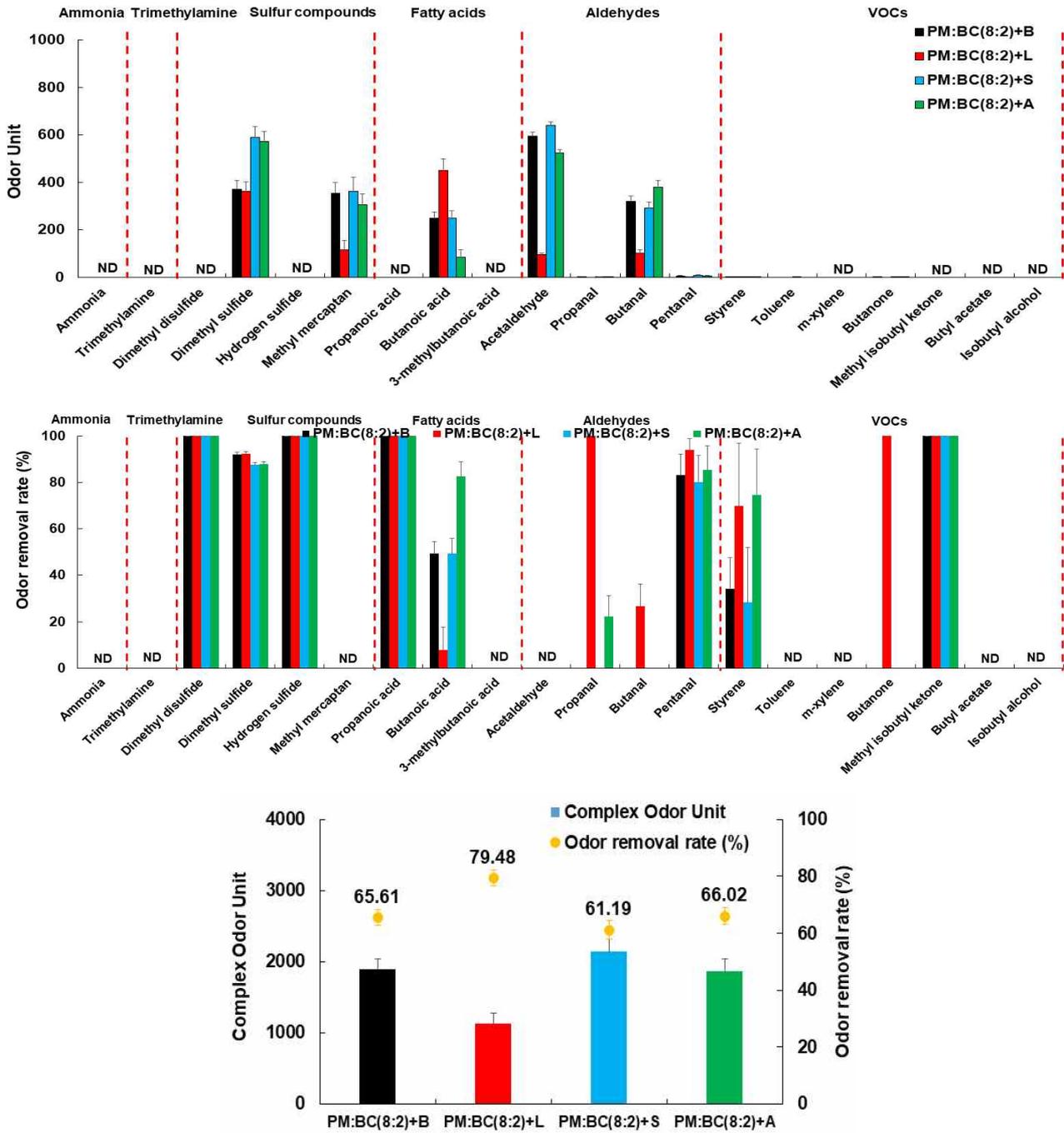


Fig. 4-32. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 24일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

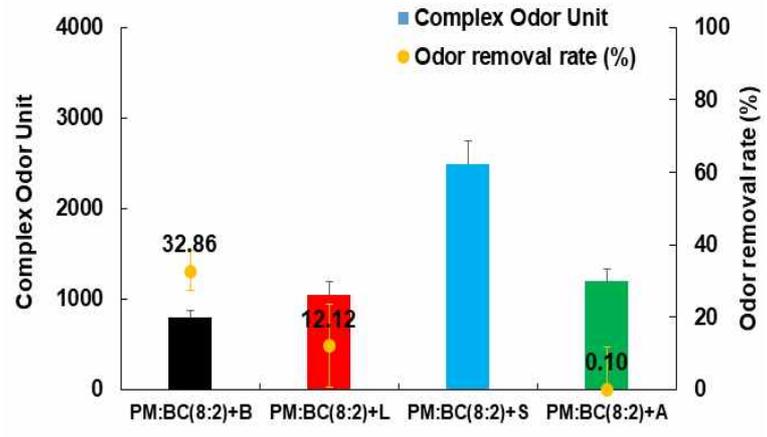
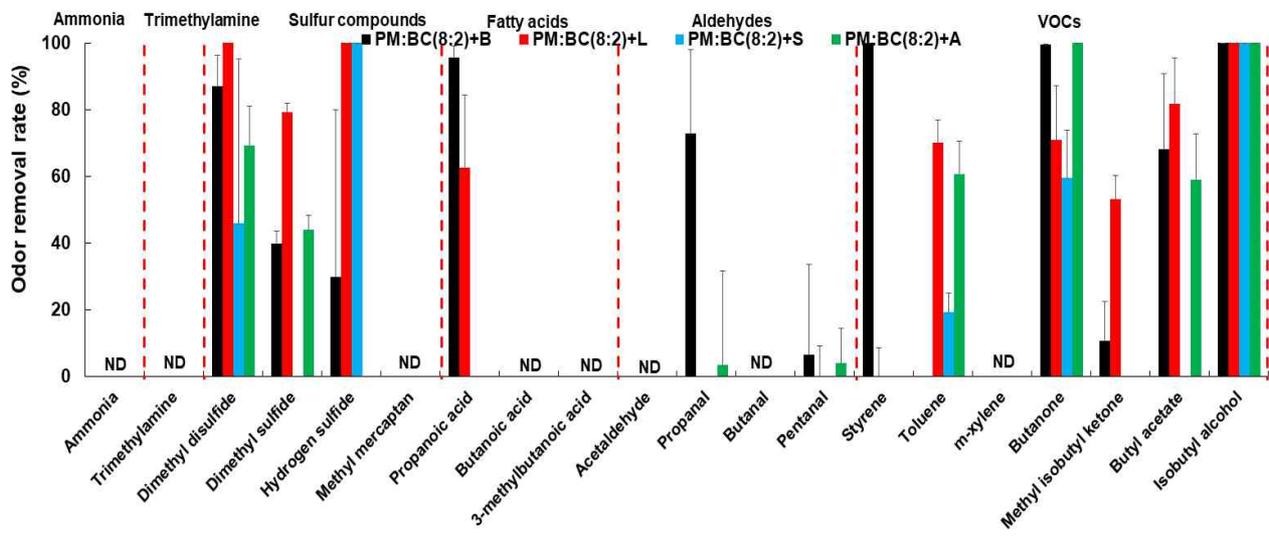
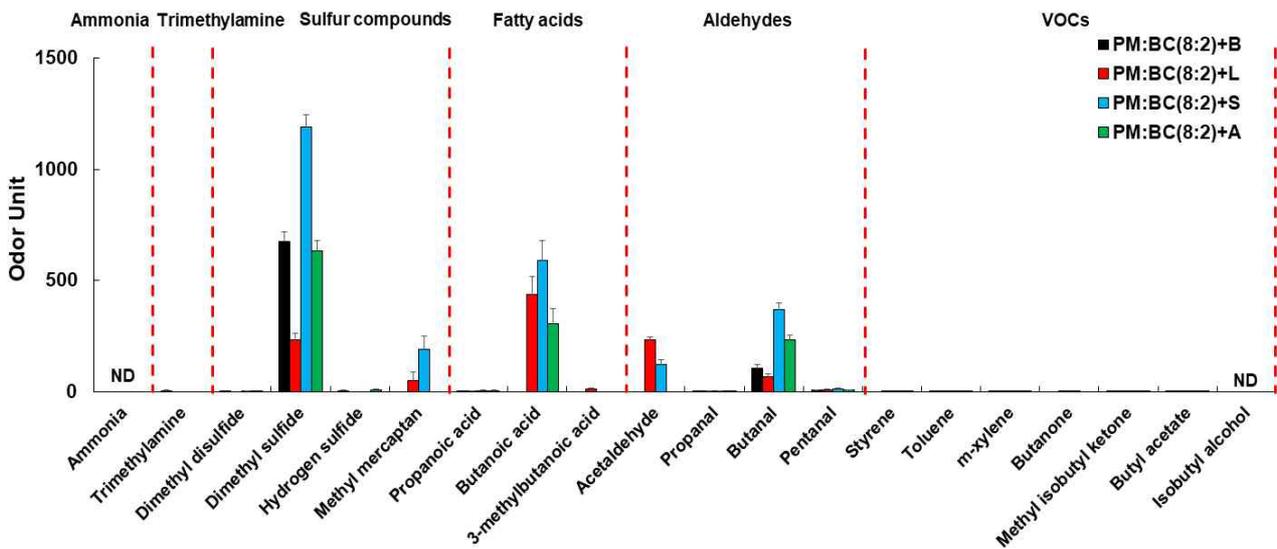


Fig. 4-33. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 36일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 40일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-34에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 40일 후 dimethyl sulfide 및 butanal 성분이 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 모두에서 검출되었으며, butanoic acid는 PM:BC(8:2)+B 및 PM:BC(8:2)+L 깔짚 적용 시에만 검출되었다.

계분뇨 투입 40일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 97.46, 97.90, 98.58 및 98.73%로 모든 깔짚의 악취 저감 효율이 증가하였다.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 4일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-35에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 4일 후 butanoic acid, butanal, dimethyl sulfide 및 methyl mercaptan 등의 악취가 주로 발생되었고 ammonia, trimethylamine, hydrogen sulfide 및 VOCs는 거의 발생하지 않았으며 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚은 전반적으로 악취 발생량이 적었다.

계분뇨 투입 4일 후 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 성분별 악취 저감 효율은 전반적으로 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚에서 더 높게 나타났으며 특히 fatty acids 저감에 효과적이었다.

계분뇨 투입 4일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 99.63 및 99.82%로 모든 깔짚에서 99% 이상의 뛰어난 악취 저감 효율을 보였다.

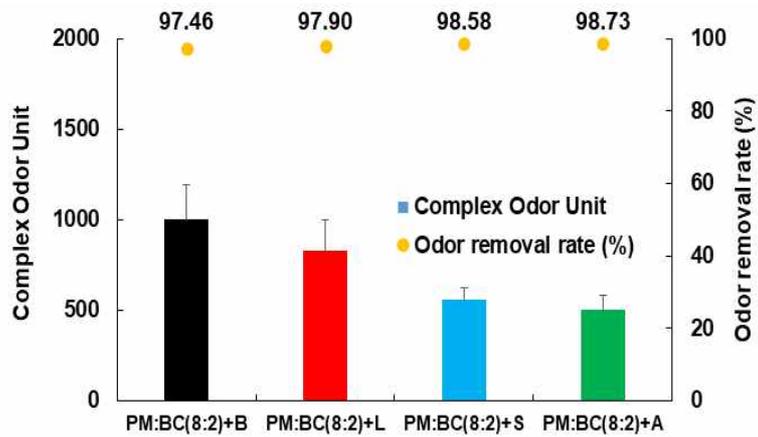
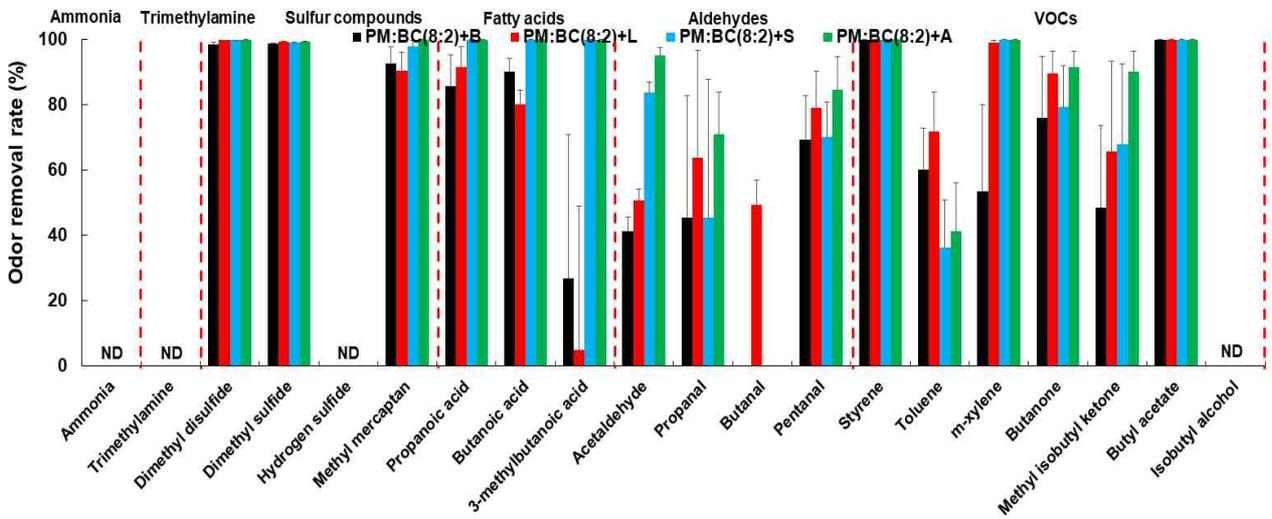
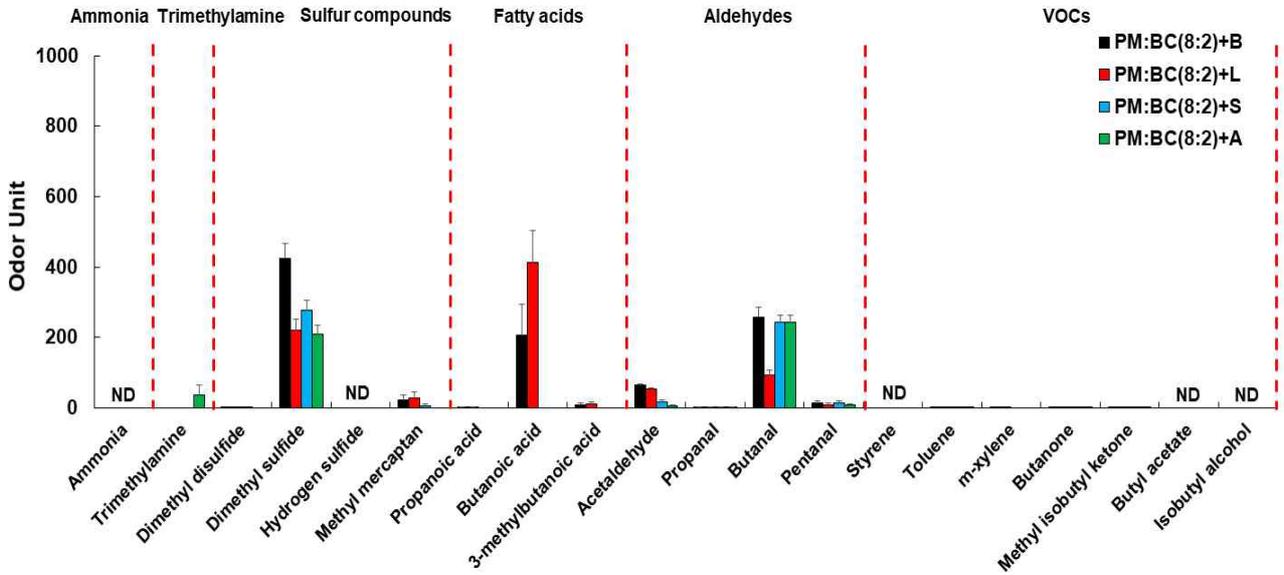


Fig. 4-34. 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

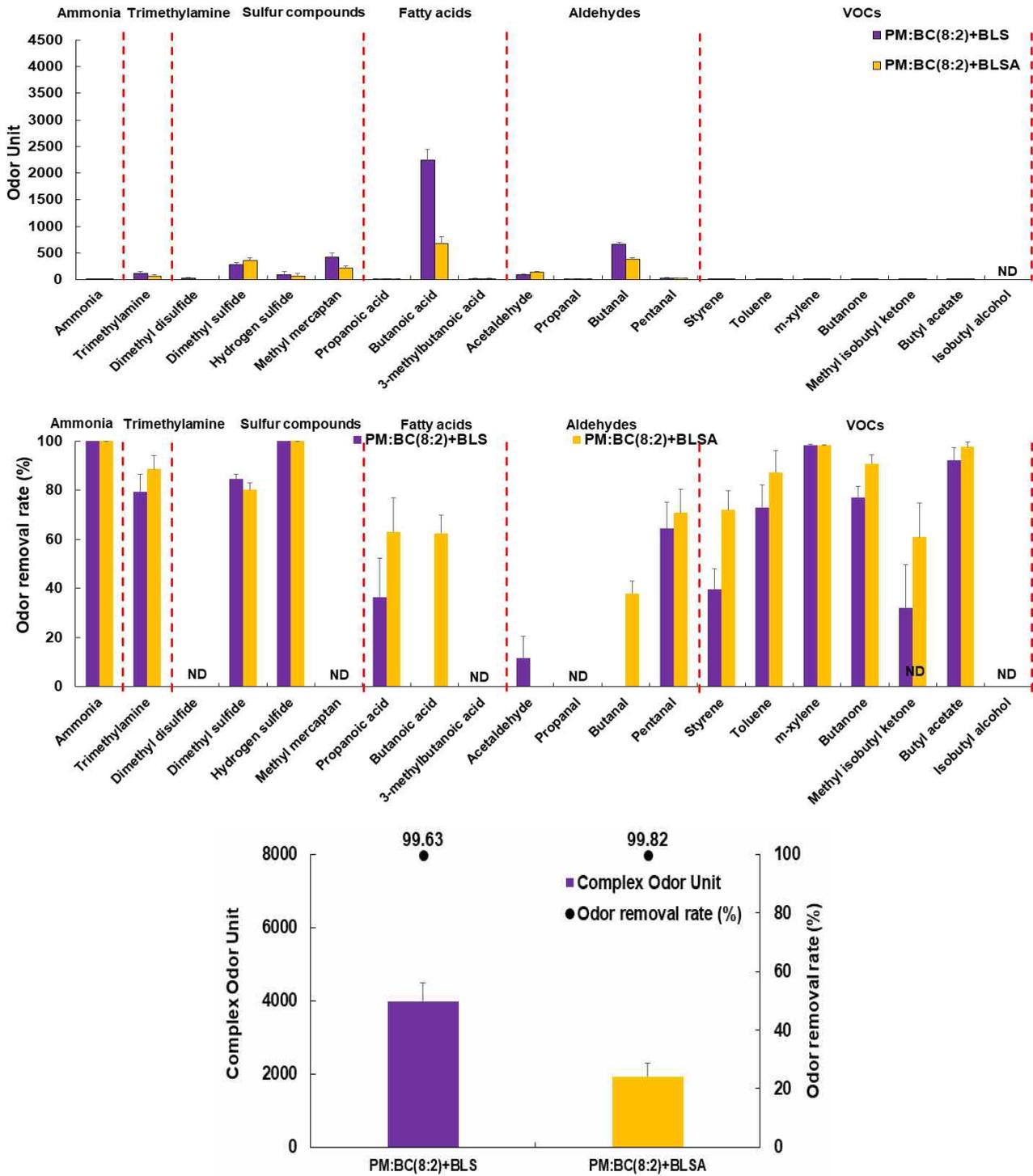


Fig. 4-35. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 4일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 12일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-36에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 12일 후 hydrogen sulfide의 발생량이 계분뇨 투입 4일 후에 비해 급격하게 증가하였으며, butanal, dimethyl sulfide 및 ammonia 등의 악취가 주로 발생되었다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 Hydrogen sulfide의 Odor Unit 값은 각각 218240 및 420240이었으며, trimethylamine, fatty acids 및 VOCs는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 12일 후 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 성분별 악취 저감 효율은 전반적으로 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚에서 더 높게 나타났으며 특히 aldehydes 저감에 효과적이었다. PM:BC(8:2)+BLS 깔짚은 계사에서 악영향을 미칠 수 있는 ammonia 및 hydrogen sulfide 저감에 효과적이었다.

계분뇨 투입 12일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 63.32 및 29.74%로 계분뇨 투입 4일 후의 악취 저감 효율에 비해 악취 저감 효율이 감소하였으며 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율이 현저히 떨어진 것은 hydrogen sulfide 발생을 저감하지 못하였기 때문이라고 판단된다.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 17일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-37에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 17일 후 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚에서 hydrogen sulfide가 대량 발생되었으며 Odor Unit 값은 각각 30384 및 3244이었다. 또한 계분뇨 투입 12일까지 발생되지 않았던 Butanoic acid 및 Acetaldehyde가 발생되었으며, ammonia, trimethylamine 및 VOCs는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 17일 후 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 Fatty acids, Aldehydes 및 VOCs에 대해 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚이 효과적으로 악취를 저감하였으며, 특히 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚이 저감하지 못한 Acetaldehyde 저감에 매우 효과적이었다.

계분뇨 투입 17일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 93.31 및 98.05%로 두 깔짚에서 90% 이상의 악취를 저감하는 효과를 확인하였다.

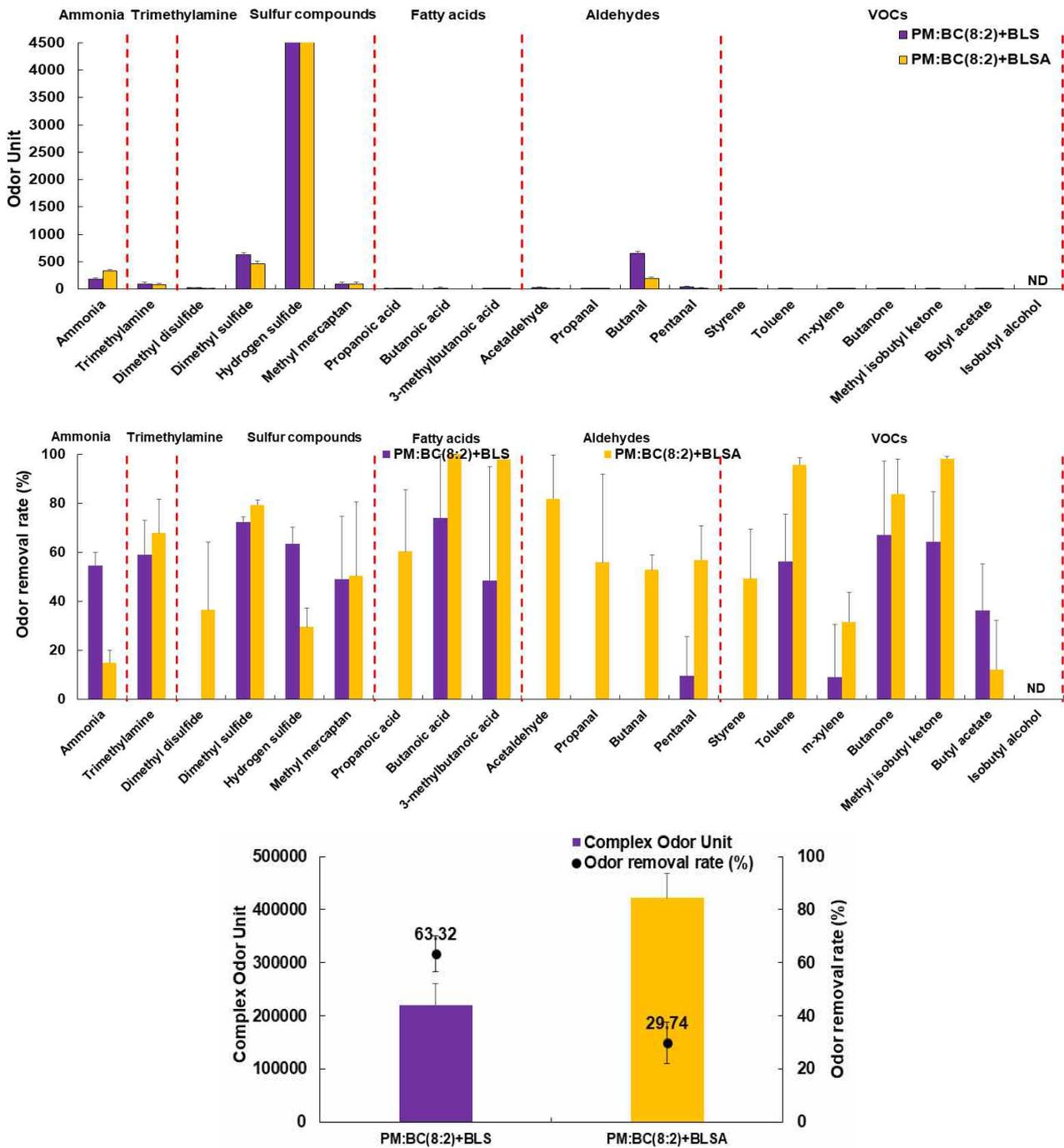


Fig. 4-36. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 12일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

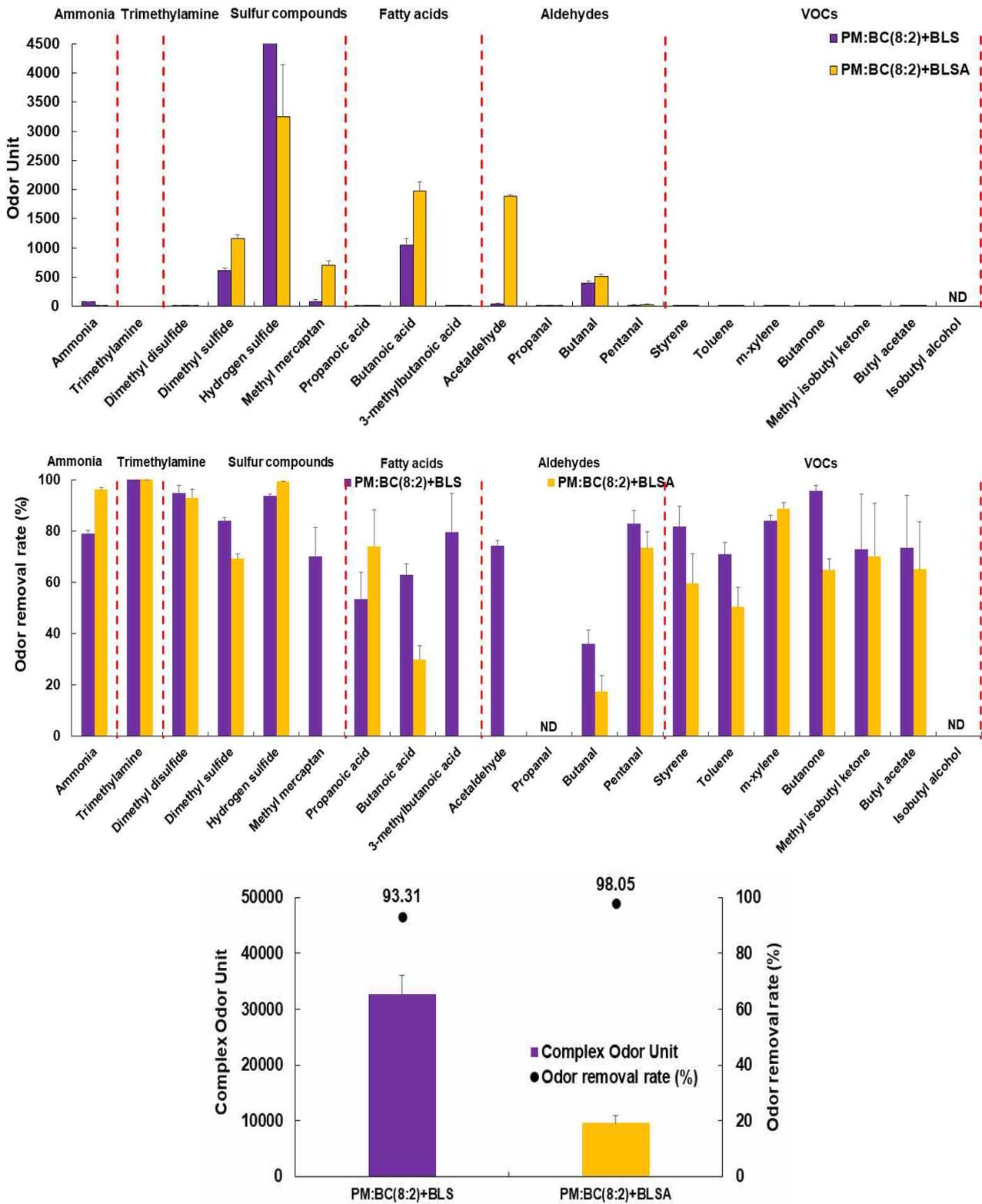


Fig. 4-37. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 17일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 24일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-38에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 24일 후 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚에서 주로 발생된 악취 성분은 dimethyl sulfide, methyl mercaptan, butanoic acid, acetaldehyde, butanal 등이 있으며, ammonia, trimethylamine, hydrogen sulfide 및 VOCs는 거의 발생하지 않았다.

계분뇨 투입 24일 후 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 성분별 악취 저감 효율은 첨가된 미생물 종류와 상관없이 유사하였으며, PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚은 aldehydes 중 propanal 성분에 대한 악취 저감 능력이 뛰어났다.

계분뇨 투입 24일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 69.96 및 79.36%로 모든 깔짚의 악취 저감 효율이 계분뇨 투입 17일 후의 악취 저감 효율에 비해 감소하였다.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 36일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-39에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 36일 후 Sulfur compounds 중 dimethyl sulfide, Fatty acids 중 butanoic acid 및 Aldehydes 중 butanal이 주로 발생했으며 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 악취 발생량이 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 발생량보다 낮았다.

계분뇨 투입 36일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 52.90 및 32.99%로 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚보다 악취 저감에 효과적이었다.

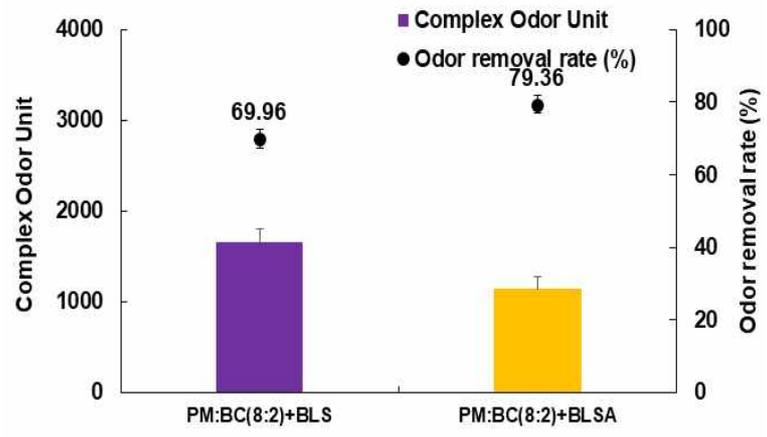
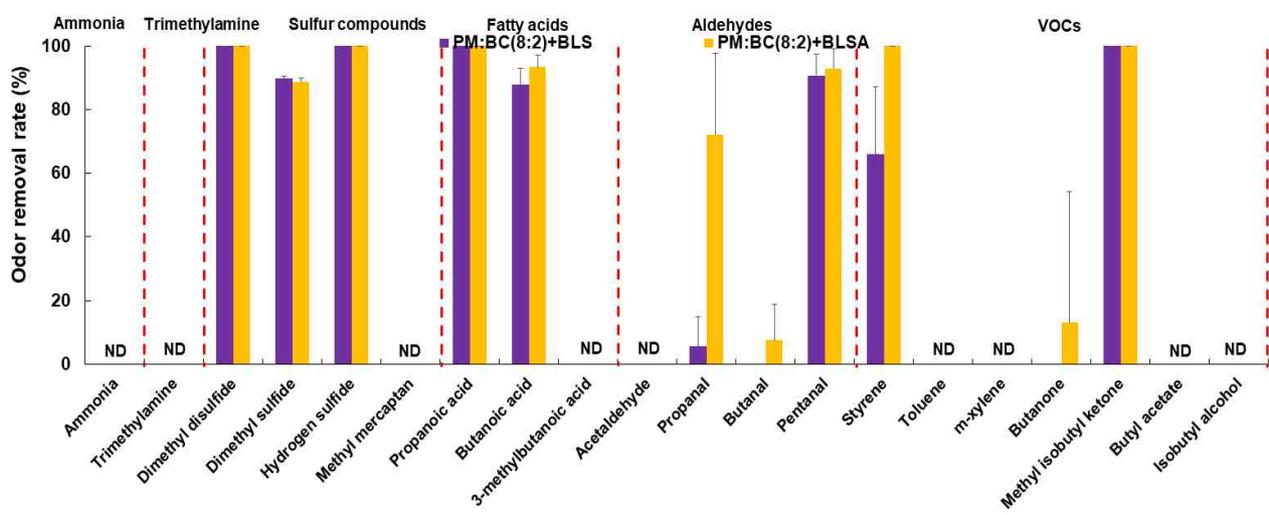
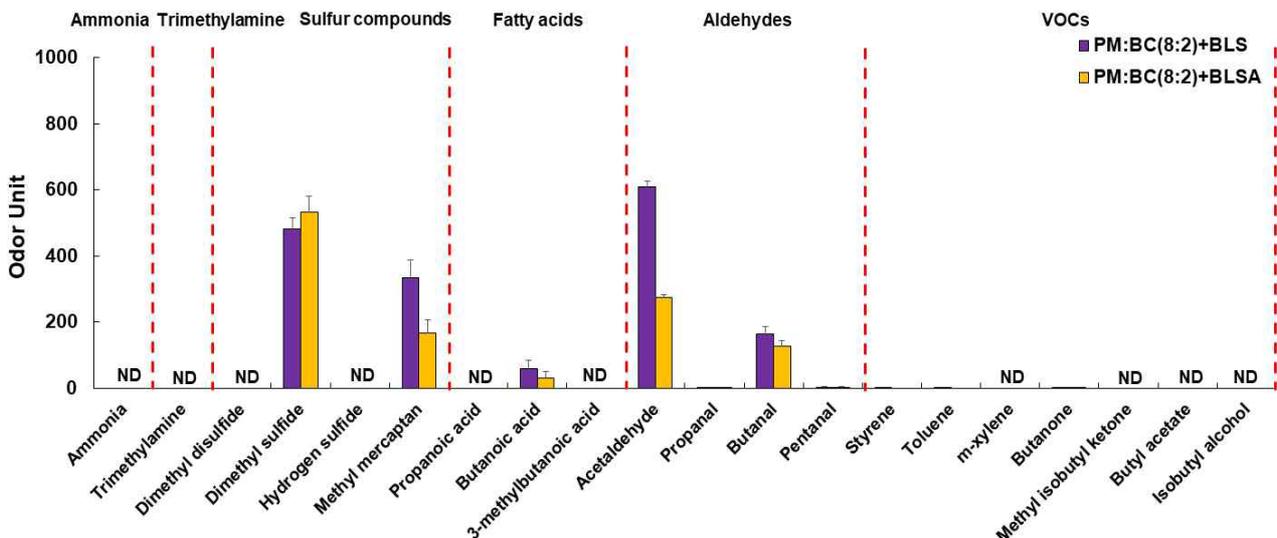


Fig. 4-38. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 24일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

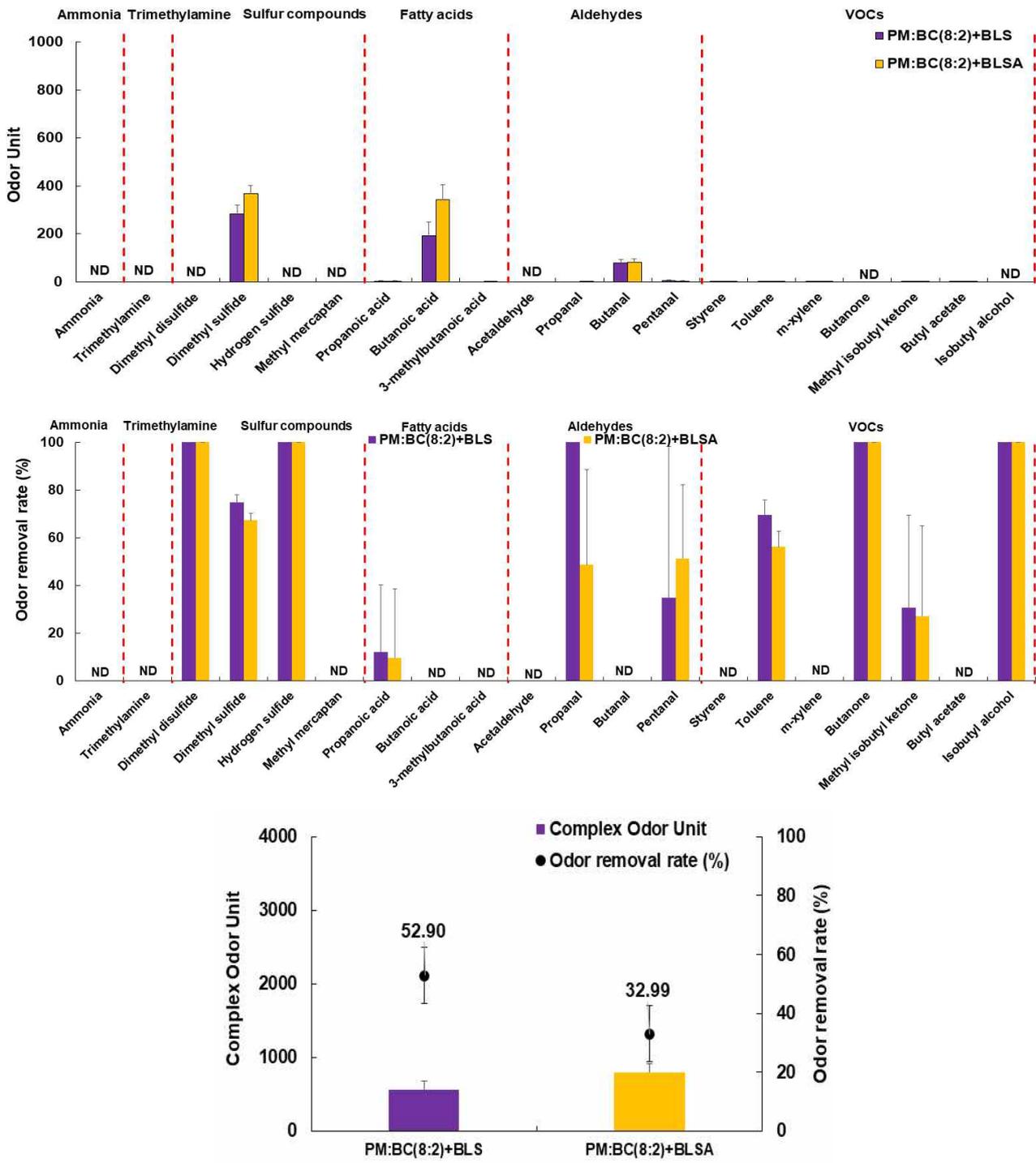


Fig. 4-39. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 36일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚을 사용하였을 때, 계분뇨 투입 40일 후 악취 발생 특성 및 왕겨 깔짚 대비 PM:BC(8:2)+B, PM:BC(8:2)+L, PM:BC(8:2)+S 및 PM:BC(8:2)+A 깔짚의 악취 저감 효율을 조사한 결과는 Fig. 4-40에서 보는 바와 같다.

계분뇨 투입 40일 후 dimethyl sulfide 및 butanoic acid 및 butanal 성분이 주로 발생되었으며, dimethyl disulfide 성분은 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚 적용 시에만 검출되었다.

계분뇨 투입 40일 후 악취 성분별 저감 효율은 전반적으로 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚보다 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚이 더 뛰어났다.

계분뇨 투입 40일 후 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 악취 발생량 및 총 Odor Unit을 도출하였으며, 왕겨 깔짚의 총 Odor Unit 대비 PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다. PM:BC(8:2)+BLS 및 PM:BC(8:2)+BLSA 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 97.84 및 97.16%로 두 깔짚 모두 뛰어난 악취 저감 능력을 보였다.

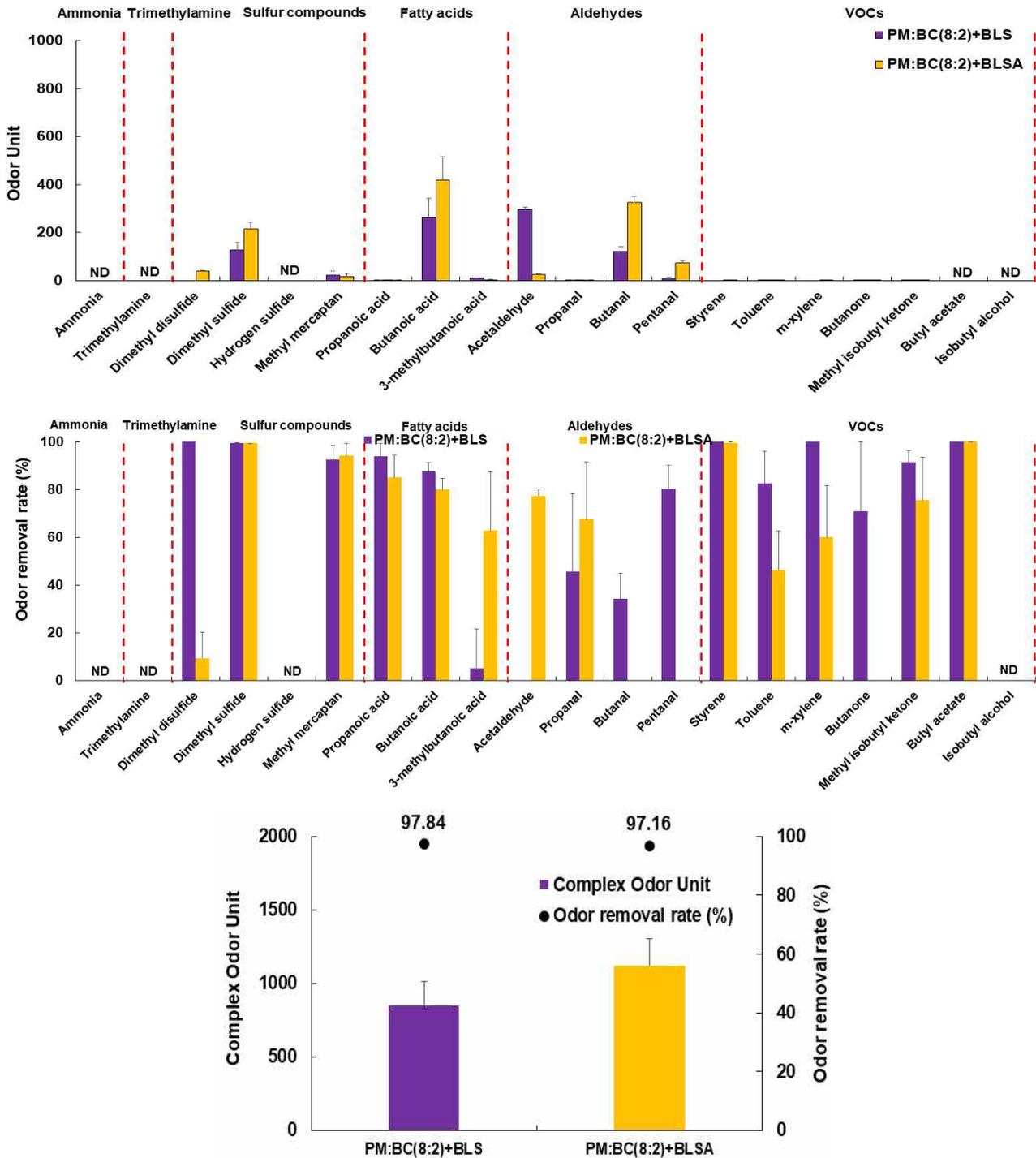


Fig. 4-40. 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚 사용 시 계분뇨 투입 40일 후의 악취 성분별 깔짚 소재에 따른 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

단일 및 혼합 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 악취 발생량과 사육 기간 동안 발생한 총 악취 발생량 및 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 악취 저감 효율을 Fig. 4-41에 나타내었다. 왕겨 깔짚의 경우 계분뇨 투입 후 17일까지 대량의 악취가 발생하였으며 24일부터 악취 발생량이 극명하게 줄어들었다. 사육 기간 동안 발생한 총 악취 발생량은 왕겨 > 피트모스 > 바이오차 > PM:BC(8:2) 순으로 높았으며, 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 피트모스, 바이오차, PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 74.3, 90.3 및 96.3%으로 PM:BC(8:2) 깔짚이 계사에서 발생하는 악취를 효과적으로 저감하는 것을 확인하였다.

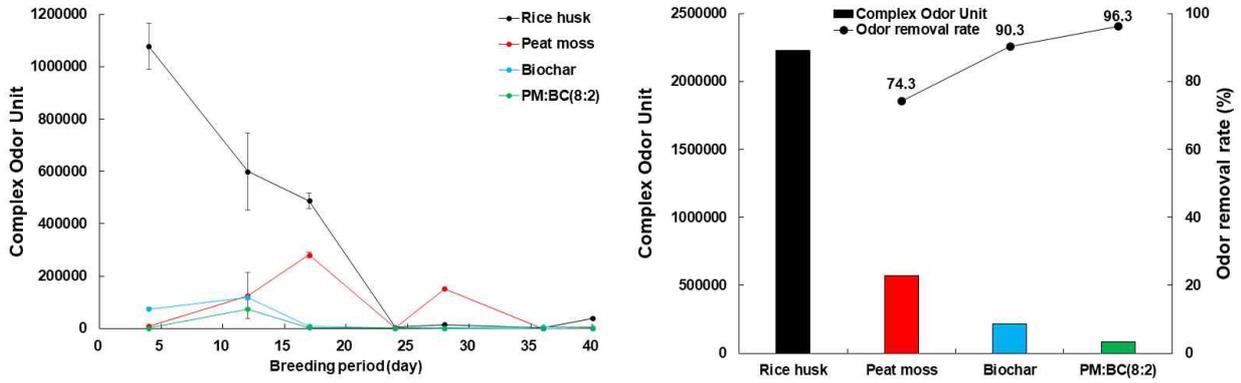


Fig. 4-41. 단일 및 혼합 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 악취 발생량과 사육 기간 동안 발생한 총 악취 발생량 및 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 악취 저감 효율.

단일 및 혼합 미생물이 첨가된 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 악취 발생량과 사육 기간 동안 발생한 총 악취 발생량 및 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 악취 저감 효율을 Fig. 4-42에 나타내었다. 사육 기간 동안 발생한 총 악취 발생량은 PM:BC(8:2)+BLSA > PM:BC(8:2)+BLS > PM:BC(8:2)+S > PM:BC(8:2)+L > PM:BC(8:2)+A > PM:BC(8:2)+B 순으로 높았으며, 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 단일 및 혼합 미생물이 첨가된 깔짚의 악취 저감 효율은 각각 PM:BC(8:2) (96.3%) > (PM:BC(8:2)+B (93.8%) > PM:BC(8:2)+A (92.0%) > PM:BC(8:2)+L (91.8%) > PM:BC(8:2)+S (88.8%) > PM:BC(8:2)+BLS (88.3%) > PM:BC(8:2)+BLSA (80.3%) 순이었으며, 미생물을 처리하지 않은 PM:BC(8:2) 깔짚의 악취 저감 효율이 가장 높았고 혼합 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 저감 효율이 단일 미생물이 첨가된 혼합 깔짚의 악취 저감 효율에 비해 낮았지만 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 경우 큰 차이가 나지 않았다.

이상의 결과들로 미루어 볼 때, PM:BC(8:2) 기반 깔짚은 기존의 깔짚인 왕겨의 악취 발생량을 효율적으로 저감할 수 있어 축사에서 발생하는 악취로 인한 피해를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 사육 기간 중 부숙 촉진 효과가 확인된 PM:BC(8:2)+BLS 깔짚의 퇴비화 과정에서의 부숙 촉진 효과가 입증된다면 악취 저감 및 부숙 촉진 효과가 뛰어난 깔짚 소재로서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

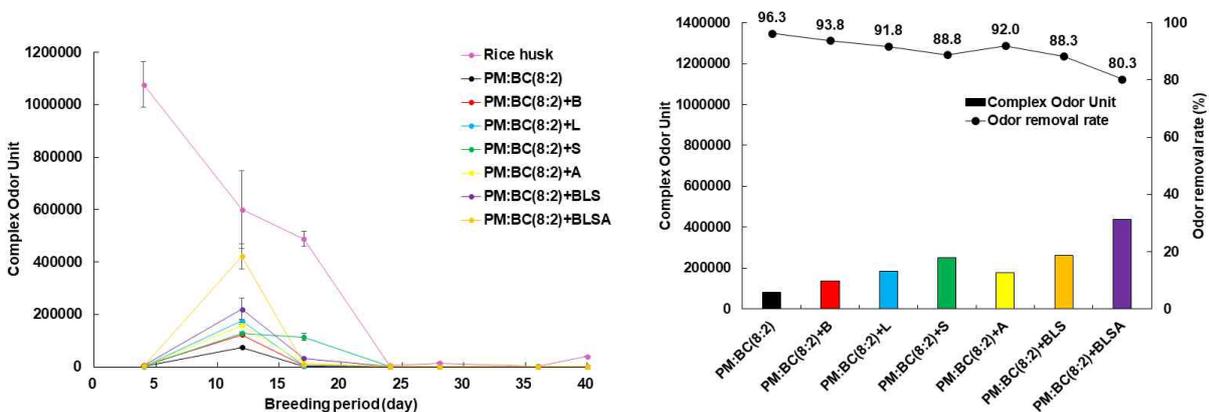


Fig. 4-42. 단일 및 혼합 미생물이 첨가된 깔짚 소재별 사육 기간에 따른 악취 발생량과 사육 기간 동안 발생한 총 악취 발생량 및 왕겨 깔짚의 악취 발생량 대비 악취 저감 효율.

(2) 우사 전용 깔짚 소재 최적화 및 퇴비화 기술 확립

(가) 우사 전용 깔짚 소재 최적 수분조절재 및 혼합비율 선정

① 단일 소재 깔짚의 수분흡수속도 시험

깔짚 종류별 우분뇨 투입에 따른 용적수분함량 변화는 Fig. 4-43에서 보는 바와 같다. 깔짚 종류별 용적수분함량은 전반적으로 초기에 우분뇨 투입량이 증가함에 따라 급격하게 증가하였으며, 일정한 수분함량에 도달한 후 더 이상 증가되지 않았다. 바이오차는 우분뇨 투입량이 우분뇨 투입 39일 후부터 45일 후까지 용적수분함량이 급격하게 증가한 이후 일정한 용적수분함량을 보였으며, 피트모스는 우분뇨 투입 36일 후부터 48일 후까지 용적수분함량이 급격히 증가한 이후 용적수분함량이 100%에 도달하였다. 반면에 톱밥과 코코피트의 용적수분함량은 바이오차와 피트모스와 달리 두 깔짚 모두 분뇨투입량에 비례하여 용적수분이 비교적 일정하게 증가하는 패턴을 보이다가 우분뇨 투입 66일 이후 용적수분함량이 약 80%가 된 이후 일정하게 유지되었다.

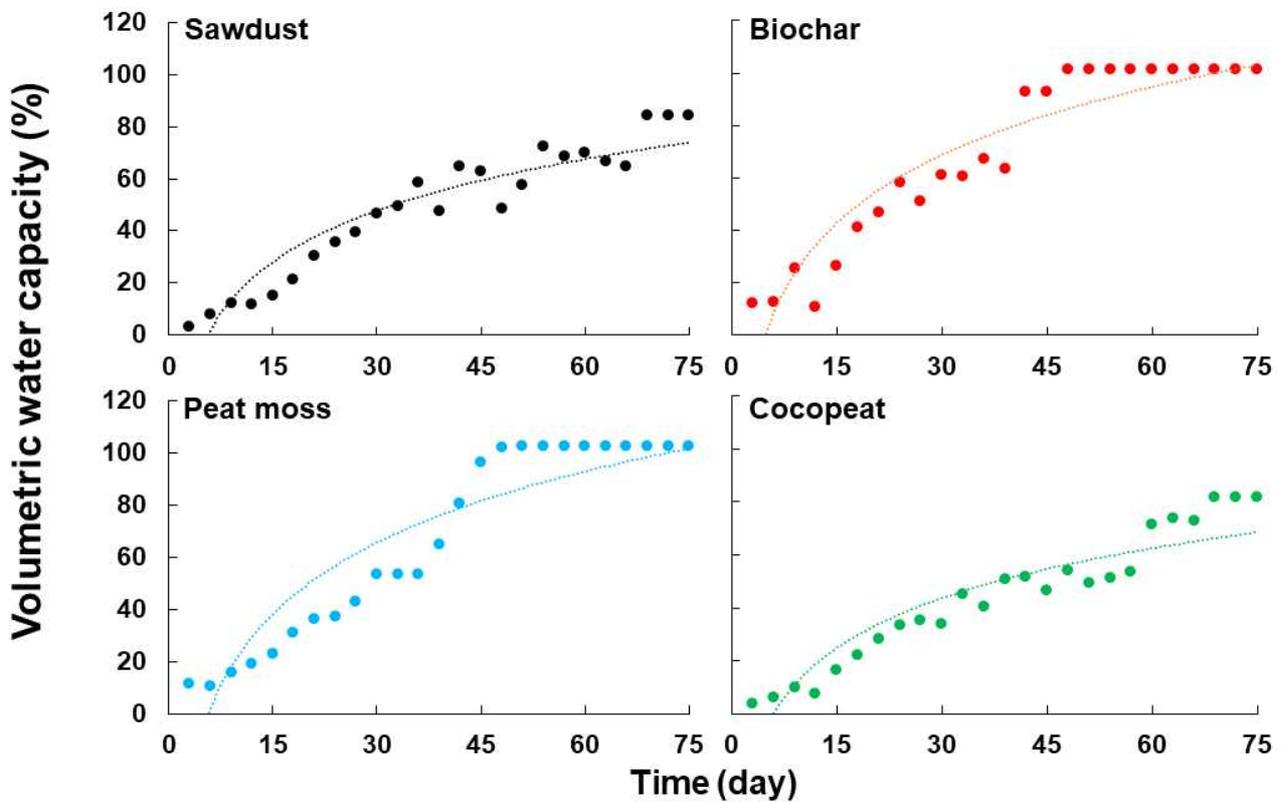


Fig. 4-43. 깔짚 종류별 우분뇨 투입에 따른 용적수분함량 변화.

우분뇨 투입에 따른 깔짚의 용적수분함량 변화 결과를 이용하여 깔짚에 처리된 우분뇨 처리 일수에 따른 일차 수분흡수속도 방정식 및 수분흡수속도는 각각 Fig. 4-44 및 Fig. 4-45에 제시된 바와 같다.

톱밥을 깔짚으로 사용한 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 두 개의 구간으로 구분할 수 있었다. 첫 번째 구간(Stage 1)은 우분뇨가 투입된 후 30일까지로 $\ln(C/C_0)=0.0961(t)-3.1882$ ($R^2=0.905^{***}$, $P<0.001$)의 방정식을 보였으며, 처리일수와 $\ln(C/C_0)$ 가 정의 상관관계를 보여 처리시일에 따른 수분흡수속도가 빠른 것으로 판단되었다. 우분뇨가 투입된 30일부터 75일까지는 $\ln(C/C_0)=0.0107(t)-0.7747$ ($R^2=0.810^{***}$, $P<0.001$)로 stage 2는 stage 1에 비해 기울기가 완만하여 수분흡수속도가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다. Stage 1의 수분흡수속도 상수(-K)는 0.0961로 stage 2의 0.0107에 비해 8.9배 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서

이는 톱밥이 깔짚으로 사용되었을 때 30일을 기점으로 수분을 흡수하는 능력이 크게 떨어지는 것을 의미하여 실제 한우사에서 권장되는 적정 교체 주기인 30일과 일치하였다. 그 동안 한우사 깔짚의 적정교체시기를 학술적으로 증명할 수 있는 자료가 거의 없었는데, 본 연구의 수분 흡수속도 패턴변화를 활용한다면 깔짚의 적정 사용기간을 예측할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

바이오차는 2구간 패턴인 톱밥과 달리 3구간으로 수분흡수패턴이 구분되어졌다. Stage 1의 구간은 0일에서 24일까지였고, stage 2는 24~42일까지였으며, stage 3은 42~75일까지 이었다. 구간별 수분흡수속도 방정식은 stage 1이 $\ln(C/Co)=0.0762(t)-1.0625$ ($R^2=0.810^{***}$, $P<0.001$)이었고, stage 2가 $\ln(C/Co)=0.0284(t)-1.1295$ ($R^2=0.819^{***}$, $P<0.001$)이었으며, stage 3이 $\ln(C/Co)=0.0020(t)-0.1018$ ($R^2=0.419^{**}$, $P<0.01$)으로 시간이 경과함에 따라 기울기가 점점 감소하는 경향을 보였다. 수분흡수속도 상수(-K)는 바이오차에 우분뇨 첨가가 시작된 stage 1에서 0.0762로 24일까지 수분흡수가 빠르게 진행된다 stage 2에서 0.0284로 2.7배 감소하였으며, 우분뇨 투입 42일이 경과하면서 0.0020으로 수분흡수가 거의 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 바이오차는 톱밥과 달리 3구간의 수분흡수패턴을 보이는 것은 바이오차의 비표면적과 공극에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 수분의 흡수는 수분조절제로 이동, 확산 및 수분조절제와 결합하는 3단계로 이루어지는데 바이오차의 경우 다른 수분조절제와 다른 흡수패턴을 보이는 것은 확산단계에서 공극크기에 따른 수분이동 속도차이에 기인하는 것으로 판단된다. 바이오차의 공극은 크게 macropore (500Å), mesopore (20-500Å), micropore(8-20Å), submicropore (<8Å)로 구분할 수 있는데, stage 1에서는 이동과 확산이 용이한 macropore와 mesopore의 흡수로 판단되며, macropore와 mesopore로 흡수된 수분이 다시 micropore와 submicropore로 이동하는 stage 2는 공극크기가 작아 상대적으로 확산이 용이하지 않기 때문에 수분흡수패턴의 차이가 나는 것으로 판단된다. 깔짚의 수분조절 연구는 아니지만 수분보유능력이 조사된 선행 연구 결과에서 바이오차의 비표면적과 공극구조가 발달되어 보수 및 보비 능력이 우수하다고 하였는데, 본 실험도 유사한 결과가 나온 것으로 판단된다. 이는 바이오차의 비표면적과 공극구조가 발달되어 있기 때문으로 판단된다.

피트모스의 수분흡수패턴은 톱밥과 유사하게 두 단계로 구분되었지만 톱밥보다 수분흡수기간(Stage 1: 0~48일, Stage 2: 48~75일)이 좀 더 긴 것으로 나타났다. 피트모스의 경우 stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $\ln(C/Co)=0.0523(t)-2.1705$ ($R^2=0.962^{***}$, $P<0.001$)이었고, stage 2는 $\ln(C/Co)=0.0002(t)-0.2333$ ($R^2=0.273^{**}$, $P<0.01$)로 우분뇨 투입 48일이 경과하면서 수분흡수속도가 급격하게 감소하였다. 일반적으로 피트모스는 무게에 비해 최대 6배까지 물을 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 수분흡수기간은 다른 깔짚소재에 비해 가장 긴 특성을 보인 반면에 수분흡수속도는 가장 낮은 특성을 보였다.

톱밥과 유사하게 코코피트의 수분흡수패턴은 2단계로 구분되었으며, 수분흡수기간도 톱밥과 거의 유사한 것으로 나타났다. 우분뇨 투입 후 24일까지가 stage 1으로 구분되었으며 이때의 수분흡수속도 방정식은 $\ln(C/Co)=0.1190(t)-3.1608$ ($R^2=0.934^{***}$, $P<0.001$)이었고, 24~75일까지가 stage 2로 수분흡수속도 방정식은 $\ln(C/Co)=0.0185(t)-1.3382$ ($R^2=0.916^{***}$, $P<0.001$)이었다. 코코피트의 수분흡수속도 상수(-K)는 0.1190으로 톱밥의 0.0961보다도 더 빠른 것으로 판단되며, 상대적으로 1차 수분흡수속도가 감소하는 지점(24일)은 다른 깔짚소재보다 가장 빨랐다. 수분흡수속도 상수는 stage 1이 stage 2보다 6.4배 빨랐다. 코코피트의 수분흡수속도 상수가 급변하는 시점인 24일까지 다른 깔짚 소재에 비해 가장 높은 수준의 수분흡수속도를 보이다가 이후 급격하게 감소된 수분흡수패턴을 보여 톱밥과 유사한 교체주기로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 깔짚 종류별 수분흡수속도는 초기의 경우 코코피트 > 톱밥 > 바이오차 > 피트모스 순으로 높았고, 깔짚의 적정 교체 주기로 판단되는 기간은 피트모스 > 바이오차 > 톱밥 > 코코피트 순으로 길었다. 코코피트 깔짚의 초기 수분흡수속도는 코코피트의 높은 수분흡수력에 의해 깔짚 중 가장 빨랐으나 교체주기가 24일로 가장 짧았다. 톱밥은 코코피트 다음으로 빠른 초기 흡수속도를 가졌으나 교체주기가 30일로 톱밥 다음으로 짧았다. 바이오차는 가장 짧은 구간의 초기 흡수속도 구간을 나타냈으나 이후 나타나는 추가적인 수분 흡수로 인해 교체주기가 42일로 톱밥에 비해 길었다. 피트모스의 경우 가장 느린 초기 흡수속도를 보였으나 깔짚의 교체주기는 48일로 가장 긴 것으로 확인되었다. 깔짚의 적정 교체 주기와 수분흡수속도는 상반된 결과를 나타냈는데, 이는 깔짚의 특수성에 의한 것으로 깔짚의 사용기간은 깔짚의 수분에 포화되는 시점에 의해 결정되는 것이 아닌, 수분을 일정한 수준의 속도로 흡수할 수 있는 기간에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

최종적으로 우분뇨에 대한 깔짚 교체 주기가 가장 길었던 피트모스 및 바이오차가 최적의 깔짚 소재라고 판단하였다.

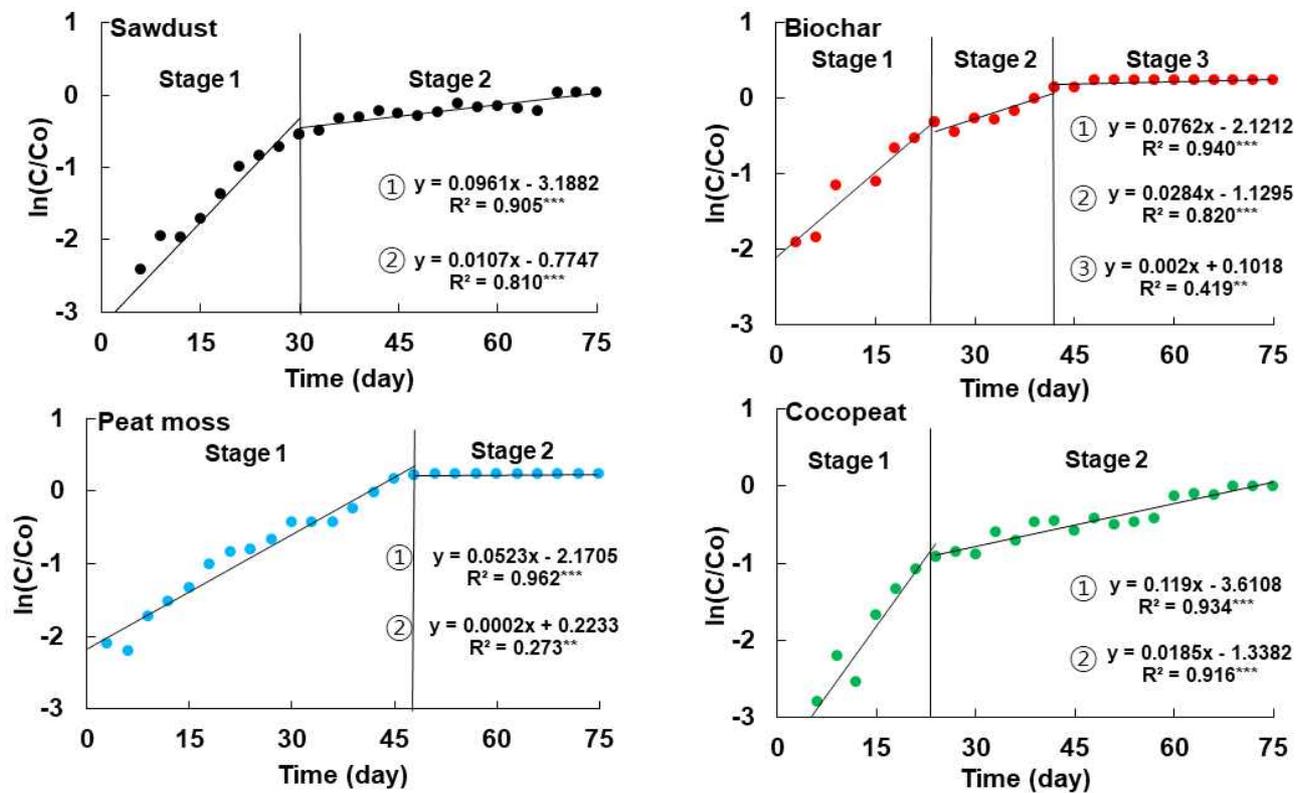


Fig. 4-44. 깔짚 종류별 우분뇨 투입에 따른 일차 수분흡수속도 방정식.

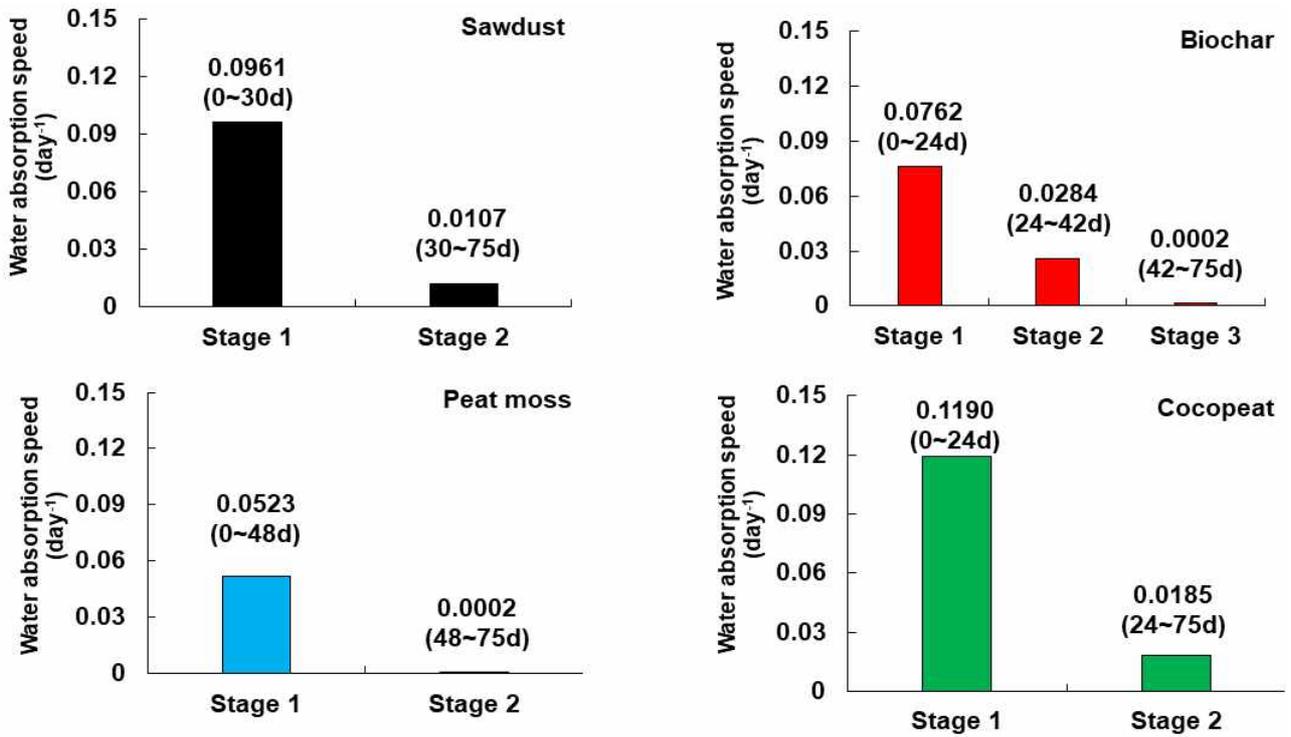


Fig. 4-45. 깔짚 종류별 우분뇨 투입에 따른 수분흡수속도.

② 혼합 깔짚의 수분흡수속도 시험

최적의 깔짚 소재로 선정된 피트모스와 바이오차를 혼합하여 최적의 혼합 비율을 선정하고자 하였으며 혼합 비율별 우분뇨 투입에 따른 용적수분함량 변화는 Fig. 4-46에 제시된 바와 같다.

혼합 비율별 용적수분함량은 전반적으로 초기에 우분뇨 투입량이 증가함에 따라 급격하게 증가하였으며, 일정한 수분 함량에 도달한 후 더 이상 증가되지 않았다. 피트모스와 바이오차를 8:2의 비로 혼합한 PM:BC(8:2) 깔짚을 사용한 경우, 우분뇨 투입량이 우분뇨 투입 36일 후부터 45일 후까지 용적수분함량이 급격하게 증가한 이후 용적수분함량이 100%에 도달하였다. 피트모스와 바이오차를 2:8의 비로 혼합한 PM:BC(2:8) 깔짚을 사용한 경우, 우분뇨 투입 39일 후부터 45일 후까지 용적수분함량이 급격히 증가한 이후 용적수분함량이 100%에 도달하였다.

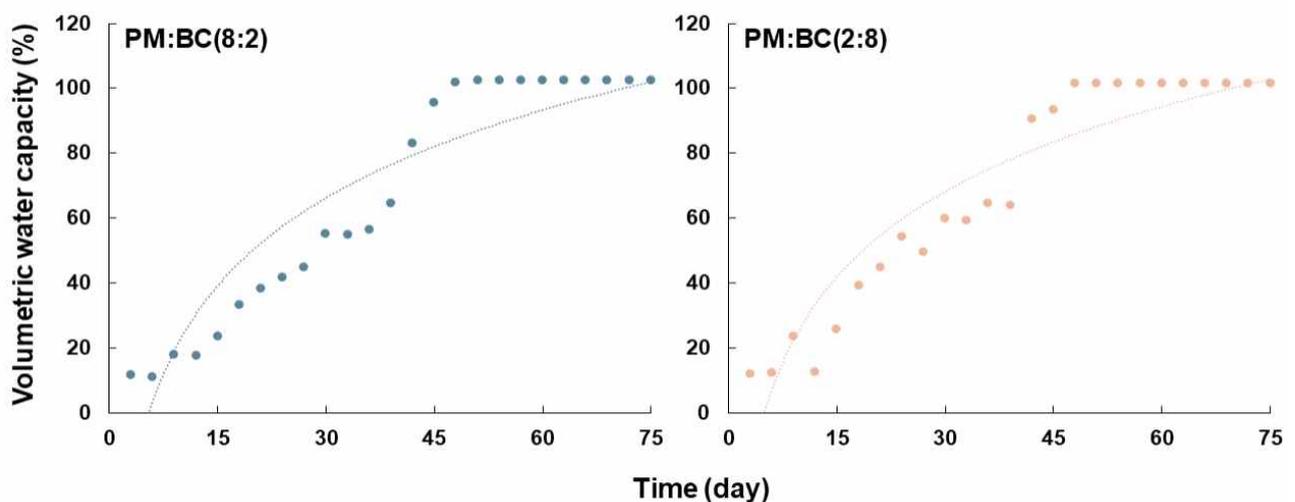


Fig. 4-46. 혼합 비율별 우분뇨 투입에 따른 용적수분함량 변화.

혼합 비율별 우분뇨 투입에 따른 일차 수분흡수속도 방정식 및 수분흡수속도는 Fig. 4-47에 제시된 바와 같다.

PM:BC(8:2) 깔짚을 사용한 경우, 일차 수분흡수속도 방정식은 피트모스와 유사하게 2 단계로 구분할 수 있었다. PM:BC(8:2)의 수분흡수패턴은 톱밥과 유사하게 2 단계로 구분되었지만 피트모스보다 수분흡수기간(Stage 1: 0~45일, Stage 2: 45~75일)이 3일 짧게 나타났다. PM:BC(8:2) 깔짚의 경우 stage 1의 수분흡수속도 방정식은 $\ln(C/Co)=0.0526(t)-2.1185$ ($R^2=0.952^{***}$, $P<0.001$)이었고, stage 2는 $\ln(C/Co)=0.0012(t)+0.1579$ ($R^2=0.295^{**}$, $P<0.01$)로 우분뇨 투입 45일이 경과하면서 수분흡수속도가 급격하게 감소하였다.

PM:BC(2:8) 깔짚을 사용한 경우, 바이오차와 유사하게 3구간으로 수분흡수패턴이 구분되어 졌다. Stage 1의 구간은 0일에서 24일까지였고, stage 2는 24~42일까지였으며, stage 3은 42~75일까지이었다. 구간별 수분흡수속도 방정식은 stage 1이 $\ln(C/Co)=0.0756(t)-2.1736$ ($R^2=0.947^{***}$, $P<0.001$)이었고, stage 2가 $\ln(C/Co)=0.0299(t)-1.2225$ ($R^2=0.863^{***}$, $P<0.001$)이었으며, stage 3이 $\ln(C/Co)=0.0024(t)+0.0784$ ($R^2=0.426^{**}$, $P<0.01$)으로 시간이 경과함에 따라 기울기가 점점 감소하는 경향을 보였다. 수분흡수속도 상수(-K)는 PM:BC(2:8) 깔짚에 우분뇨 첨가가 시작된 stage 1에서 0.0756으로 24일까지 수분흡수가 빠르게 진행된다 stage 2에서 0.0299로 2.5배 감소하였으며, 우분뇨 투입 42일이 경과하면서 0.0024로 수분흡수가 거의 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

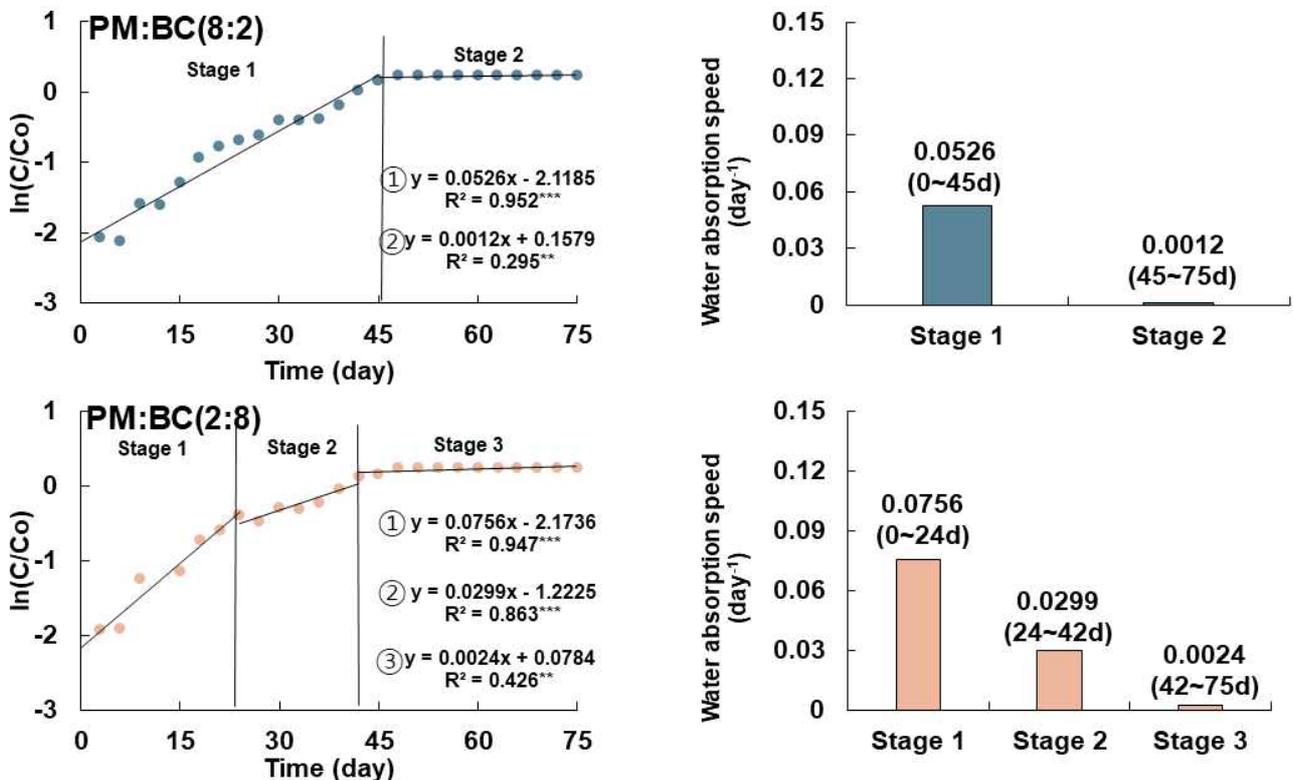


Fig. 4-47. 혼합 비율별 우분뇨 투입에 따른 일차 수분흡수속도 방정식 및 수분흡수속도.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 혼합 비율별 수분흡수속도는 초기의 경우 PM:BC(2:8) > PM:BC(8:2) > 톱밥 순으로 높았고, 깔짚의 적정 교체 주기로 판단되는 기간은 PM:BC(8:2) (45일) > PM:BC(2:8) (42일) > 톱밥 (30일) 순으로 길었다.

최종적으로 우분뇨에 대한 깔짚 교체 주기가 45일로 길었던 PM:BC(8:2) 깔짚이 최적의 혼합 깔짚이라고 판단하였다.

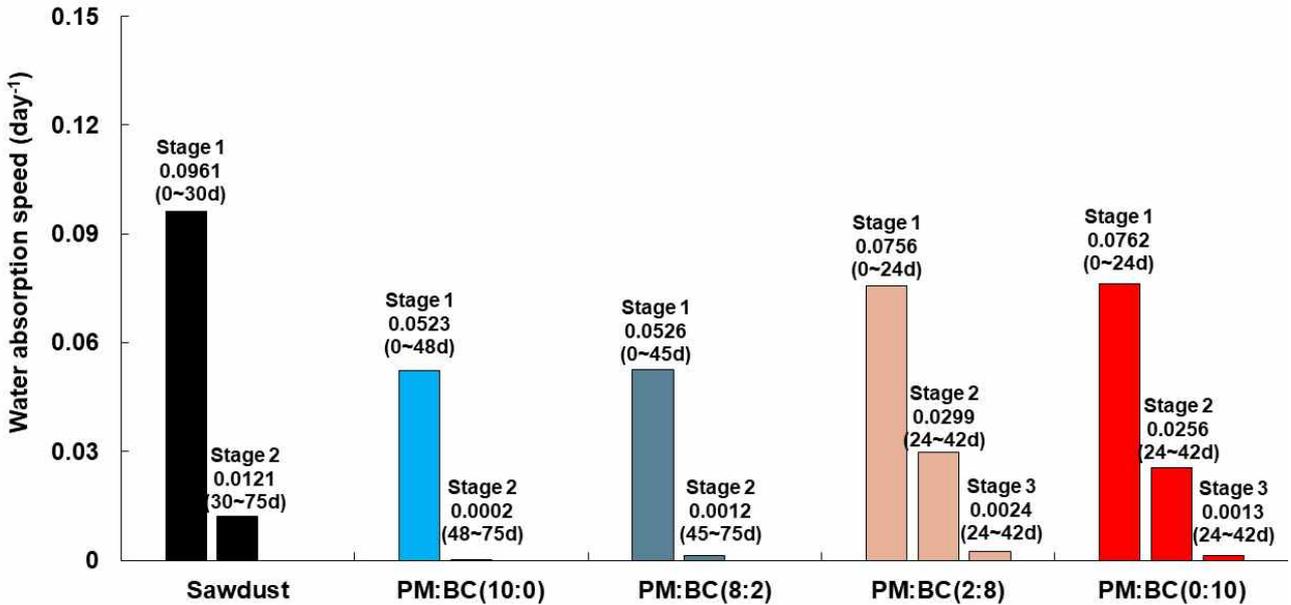


Fig. 4-48. 톱밥 및 혼합 비율별 혼합 깔짚의 우분뇨 투입에 따른 수분흡수속도.

(나) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 허용한계치 및 일수 확립

상기 (가)항의 Fig. 5의 결과를 미루어 볼 때, 수분흡수속도 상수가 급격하게 감소하는 것은 수분을 흡수하는 능력이 크게 떨어지는 것을 의미하여 수분흡수속도 상수가 급변하는 부분을 계사의 깔짚 적정 교체 시기라 판단하였다. 기존에 깔짚으로 사용하던 톱밥은 30일을 기점으로 수분흡수속도 상수가 급변하기 때문에 30일을 깔짚 사용 최대 일수로 판단되었다. 최적 혼합 깔짚인 PM:BC(8:2) 깔짚은 45일을 기점으로 수분흡수속도 상수가 급변하여 깔짚 사용 최대 일수가 50% 증가되었다. 본 시험에서의 결과는 일반적으로 알려진 우사의 적정 깔짚 교체 주기와 유사하여, PM:BC(8:2) 깔짚을 이용할 시 실제 우사에서 깔짚 교체 주기를 연장할 수 있을 것으로 기대된다.

(다) 최적화된 깔짚 소재의 우분뇨에 대한 악취 저감 효율 평가

① 단일 소재 깔짚의 악취 저감 효율 평가

악취 저감 효율 평가를 위해 우분뇨의 지정악취물질 발생 특성을 분석한 결과는 Fig. 4-49에서 보는 바와 같다.

우분뇨에서 발생하는 악취물질 측정 결과, 주로 발생하는 악취 물질은 ammonia, hydrogen sulfide, butanoic acid, acetaldehyde 및 butanone 등이 있으며 각각 102.0, 320.2, 32.2, 143.0 및 40.2 nmol/mol의 악취가 발생하였다. 우분뇨의 주요 악취 물질 이외에도 trimethylamine, dimethyl sulfide, propanoic acid, 3-methylbutanoic acid, propanal, pentanal, styrene, m-xylene 및 methyl isobutyl ketone 등이 각각 2.90, 3.72, 2.40, 2.96, 3.10, 4.75, 2.36, 2.17 및 1.00 nmol/mol 정도로 미량 발생하였고, dimethyl disulfide, methyl mercaptan, butanal, toluene, butyl acetate 및 isobutyl alcohol 등은 검출되지 않았다. 하지만 악취는 단일 성분의 악취 물질에 의해 결정되는 것이 아닌 다양한 악취 물질의 복합적인 상호작용에 의해 결정되기 때문에 단순 농도로 악취를 평가하는 것은 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 추가적으로 사람이 악취를 인지하는 기여도를 고려한 Odor Unit으로 환산된 값을 사용하여 악취를 평가하였다. Odor Unit은 악취의 기여도를 고려하였기 때문에 복합 악취의 기준에서 볼 때 단일 악취의 절대 농도보다 악취를 평가하기에 더 적합할 것으로 판단된다.

우분뇨에서 발생하는 악취 물질을 Odor Unit으로 환산한 결과 주로 발생하는 악취는 trimethylamine, dimethyl sulfide, hydrogen sulfide, butanoic acid, acetaldehyde 및 pentanal 등이 있었으며, 각각의 Odor Unit 값은 29.0, 37.2, 640.4, 460.0, 71.5 및 23.8으로 hydrogen sulfide와 butanoic acid가 가장 높았다. 이들 주요 악취 물질 이외에 ammonia, propanoic acid, 3-methylbutanoic acid, propanal, styrene, m-xylene, butanone 및 methyl isobutyl ketone의 Odor Unit 값은 각각 1.02, 1.20, 9.87, 1.55, 0.08, 0.05, 0.09 및 0.01이었다 (Fig. 4-49). 위 결과에서 ammonia, acetaldehyde 및 butanone은 악취 최소감지농도가 높아 악취 발생량에 비해 Odor Unit이 크게 감소하였고, 이와 대조적으로 trimethylamine, dimethyl sulfide, hydrogen sulfide, butanoic acid 및 pentanal은 악취 최소감지농도가 낮아 Odor Unit이 증가하는 경향을 보였으며 이 성분들이 복합 악취에서의 기여도가 높은 것으로 판단된다.

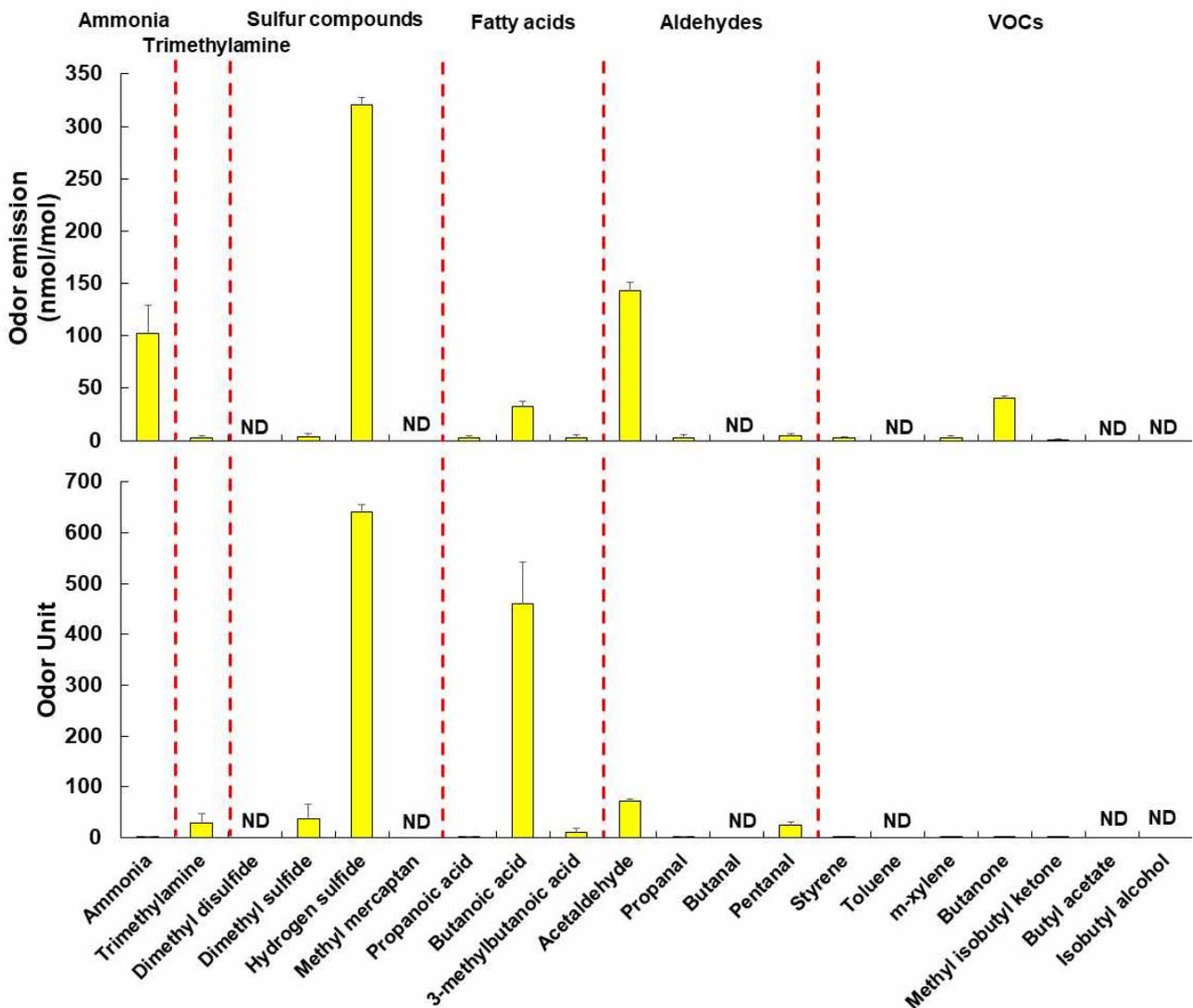


Fig. 4-49. 우분뇨의 지정악취물질 발생 특성.

갈짚 소재가 적용되었을 때, 갈짚 소재별 지정악취물질의 발생 특성은 Fig. 4-50에서 제시된 바와 같다.

갈짚 소재가 적용되었을 때의 악취 발생 특성은 우분뇨의 악취 발생 특성과 차이가 있었다. 우분뇨에서 발생량이 적었던 dimethyl sulfide, butanal의 발생량이 증가하였고, 우분뇨에서 대량 발생되던 hydrogen sulfide, butanoic acid 및 butanal의 악취 발생량은 감소되는 경향을

보였다. 악취 발생량은 전반적으로 톱밥 > 코코피트 > 피트모스 > 바이오차 순으로 높게 나타났다.

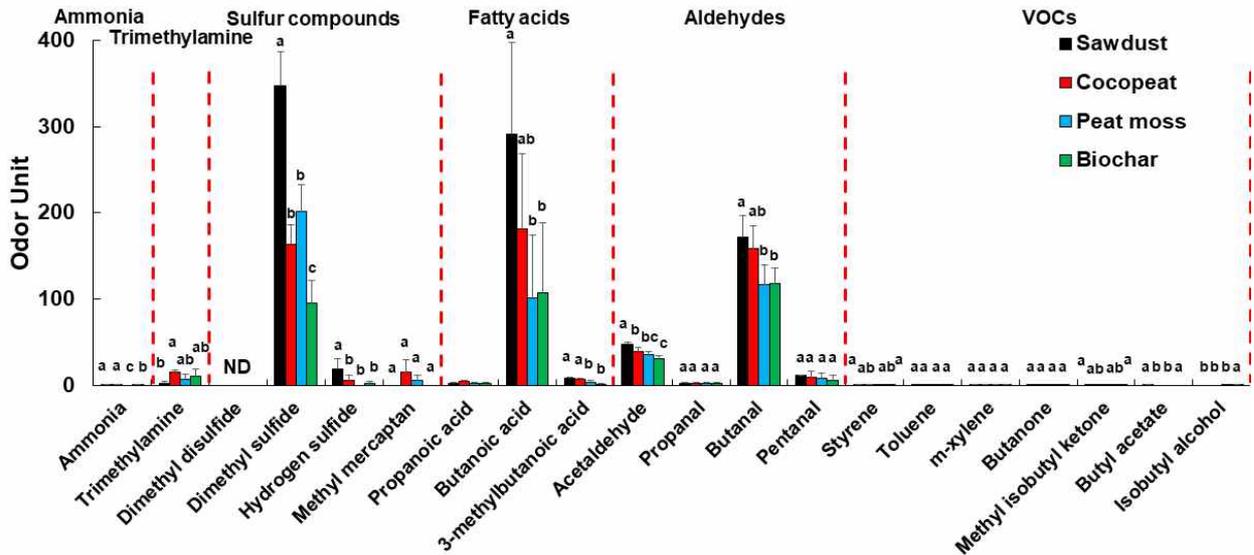


Fig. 4-50. 깔짚 소재별 우분뇨에 대한 지정악취물질 발생 특성.

깔짚 소재별 우분뇨에 대한 지정악취물질의 저감 효율은 Fig. 4-51에 나타난 바와 같다.

우분뇨에 깔짚 소재를 혼합하고 악취 성분의 농도를 측정한 결과 ammonia, hydrogen sulfide, butanoic acid, acetaldehyde, butanone 등 우분뇨에서 주로 발생하였던 악취 물질들의 발생량이 깔짚 소재에 따라 차이는 있지만 감소하는 경향을 보였다. 깔짚 소재별로 ammonia, hydrogen sulfide 및 butanoic acid는 피트모스 > 바이오차 > 코코피트 > 톱밥 순으로 악취 발생량이 감소하였으며, 피트모스를 투입하였을 때 ammonia가 거의 100%가깝게 저감되어 검출이 되지 않았고 hydrogen sulfide는 모든 처리구에서 악취 발생량이 크게 감소되어 97% 이상의 악취 저감률을 보였다. Acetaldehyde 및 butanone은 바이오차 > 피트모스 > 코코피트 > 톱밥 순으로 악취 발생량이 감소하였고, acetaldehyde는 깔짚 소재에 따라 발생량의 34.3-57.3%가 저감되었으며 butanone은 발생량의 95.3 - 98.0%가 저감되는 높은 저감률을 보였다. 깔짚 소재의 투입에 따라 악취 발생량이 감소되는 성분이 있는 반면에, dimethyl disulfide, propanoic acid, propanal, butanal 및 m-xylene은 깔짚 소재를 투입한 후 악취 발생량이 미세하게 증가하였으며, Odor Unit은 위 결과들과 유사한 경향으로 나타났다. 우분뇨에 깔짚 소재를 투입하였을 때 악취 성분의 분류에 따른 악취 저감 효율을 평가하였다. Ammonia의 경우 피트모스가 악취 저감 효율이 가장 높았고 바이오차, 코코피트가 뒤를 따랐으며 톱밥의 악취 저감 효율이 가장 낮았는데, 이는 피트모스가 극성이 높은 다공성 물질이고 주로 리그닌과 셀룰로오스를 함유하고 있으며 알코올, 알데하이드, 케톤, 페놀 수산화물 및 에테르를 포함하는 리그닌의 작용기는 다양한 이온과 결합할 수 있는 특징을 가지고 있기 때문으로 판단된다. 또한 피트모스의 낮은 pH로 인해 우분뇨의 pH가 감소되어 암모니아 발생을 저감한 것으로 판단되며, 페놀기, 카르복실기, 하이드록실기, 카르보닐기 등 다양한 작용기가 존재하지만 비표면적이 0.96 m²/g로 매우 낮은 값을 보였다. 또한 톱밥의 pH는 8.0의 약알칼리성으로 우분뇨 내 암모니아 휘산 반응이 일어나 암모니아 저감 효율이 낮은 것으로 판단된다. 하지만 상기 ammonia 저감 효율은 우분뇨에 깔짚을 혼합한 직후부터 24시간 동안의 ammonia 발생량이 미치는 영향을 고려하지 않은 수치로, pH가 높은 바이오차 처리의 경우 혼합 과정 중에 암모니아의 휘산이 증가하여 빠르게 휘발이 일어나 악취가 더 발생하였을 수

있으며, 암모니아가 휘산된 후의 악취 측정 결과에서 수치가 더 낮게 나타났을 가능성도 있을 것으로 사료된다.

이와 대조적으로 trimethylamine은 톱밥에서 악취 저감 효율이 가장 높았는데, 이는 톱밥에는 휘발성 monoterpenes, α -pinene, β -pinene 및 limonene 등이 존재하고 있으며, 이 중 양전하를 띄고 있는 monoterpene이 trimethylamine의 음전하를 끌어당겨 trimethylamine을 감소시키기 때문으로 판단된다. 코코피트는 하이드록실기, 카르복실기, 인산기 등의 작용기를 보유하고 있어 표면이 음전하를 띄게 되어 동일한 음전하를 띄는 trimethylamine에 대한 저감 효율이 낮은 것으로 판단된다.

Sulfur compounds 중 hydrogen sulfide는 모든 깔짚 소재에서 악취 저감 효율이 높았다. 다른 연구자들의 선행 연구에서 습한 환경, 알칼리성 pH 및 다공성 물질이 hydrogen sulfide의 제거 효율을 높인다고 보고되었다. 특히 바이오차는 높은 pH와 98.3 m²/g의 넓은 비표면적을 보유한 다공성 물질로 hydrogen sulfide의 저감에 가장 효율적이었다. 톱밥, 코코피트 및 피트모스는 약 0.56-1.18 m²/g의 비표면적을 보유하고 있지만 다양한 작용기를 가지고 있고 톱밥은 약알칼리성을 띄기 때문에 hydrogen sulfide 저감 효율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 요소들이 복합적으로 작용하여 모든 깔짚 소재에서 hydrogen sulfide 저감 효율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

Fatty acids의 경우 톱밥 및 코코피트에서 보다 피트모스 및 바이오차에서 높은 악취 저감률 이 나타났고, aldehydes의 경우 바이오차 > 피트모스 > 코코피트 > 바이오차 순으로 악취 저감 효율이 높았으며, fatty acids와 aldehydes에 대한 깔짚 소재의 악취 저감 경향이 유사하였다.

휘발성 유기화합물인 VOCs는 바이오차 투입 시 악취 저감 효율이 가장 높았고 피트모스의 악취 저감 효율은 다소 낮았으며, 톱밥과 코코피트는 VOCs를 거의 저감하지 못하였다. VOCs는 비표면적이 넓은 물질에 대해 흡착이 효과적으로 일어나며 흡착제의 미세 기공이 막히게 되면 흡착에 제한적인 것으로 보고되었다. 이로 인해 미세기공이 많은 바이오차 처리에서 이들 악취 저감 효율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 Sulfur compounds 및 VOCs는 모든 깔짚 소재에서 악취가 효과적으로 감소되었고, 톱밥은 trimethylamine, 피트모스는 ammonia 및 fatty acids, 바이오차는 fatty acids 및 aldehydes의 악취 저감에 효과적이었으며 코코피트는 특이적으로 뛰어난 저감 효율을 보이는 성분이 없었다. 대체적으로 다공성 구조로 넓은 비표면적을 보유하여 악취를 수용할 수 있는 공간이 충분한 바이오차와, 비표면적은 넓지 않지만 깔짚 소재 중 가장 다양한 작용기를 보유하고 있는 피트모스가 뛰어난 악취 저감 효율을 보였다. 또한 본 연구를 통해 우사에서 주민의 생활에서 가장 큰 영향을 미치는 악취는 Odor Unit이 가장 높은 hydrogen sulfide, butanoic acid 및 acetaldehyde 등이었으며, 이 물질들에 대한 저감 효율은 바이오차와 피트모스가 다른 깔짚 소재에 비해 가장 효과적이었다.

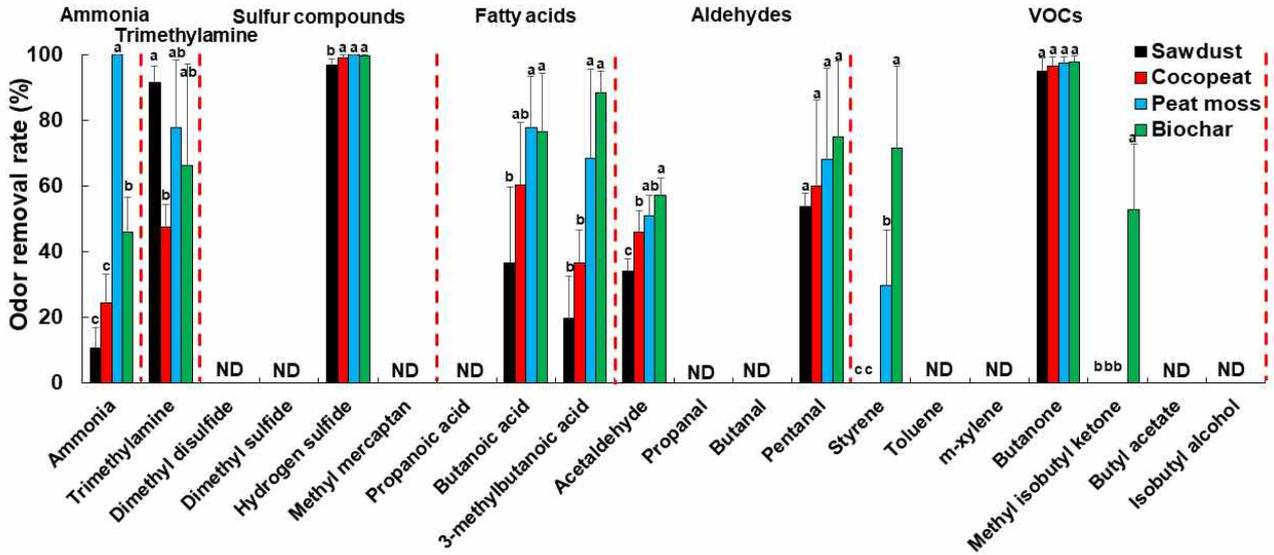


Fig. 4-51. 깔짚 소재별 우분뇨에 대한 지정악취물질 저감 효율.

복합적인 악취 발생량 및 저감 효율을 평가하기 위하여 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 Odor Unit을 도출하였으며, 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다 (Fig. 4-52). 개별 악취의 기여도를 고려한 복합 악취 개념의 Odor Unit에 대한 저감 효율은 바이오차 (70.7%) > 피트모스 (62.2%) > 코코피트 (52.9%) > 톱밥 (29.2%) 순으로 높았으며 바이오차 및 피트모스의 악취 저감 효율은 톱밥에 비해 각각 41.5% 및 33.0% 높은 뛰어난 악취 저감 효율을 보유한 효과적인 악취 저감용 깔짚 소재임을 확인하였다.

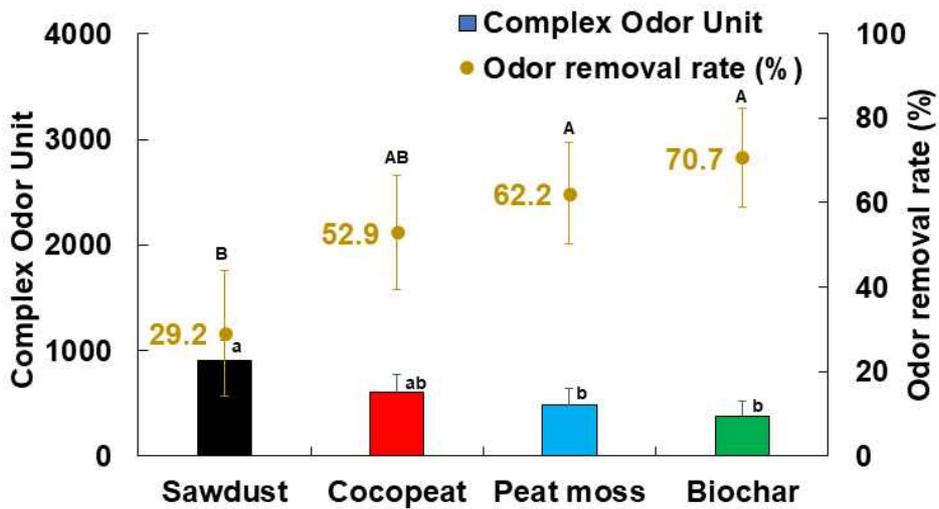


Fig. 4-52. 깔짚 소재별 우분뇨에 대한 복합 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

② 혼합 깔짚의 악취 저감 효율 평가

피트모스와 바이오차를 혼합하여 제조한 혼합 깔짚의 혼합 비율별 지정악취물질의 발생 특성은 Fig. 4-53에서 제시된 바와 같다.

피트모스와 바이오차를 사용한 깔짚의 경우 전반적으로 톱밥에 비해 낮은 악취 발생량을 보였으며, 피트모스와 바이오차를 단일로 사용하였을 때보다 피트모스와 바이오차를 혼합하여 사용하였을 때 악취가 더 적게 발생되었다.

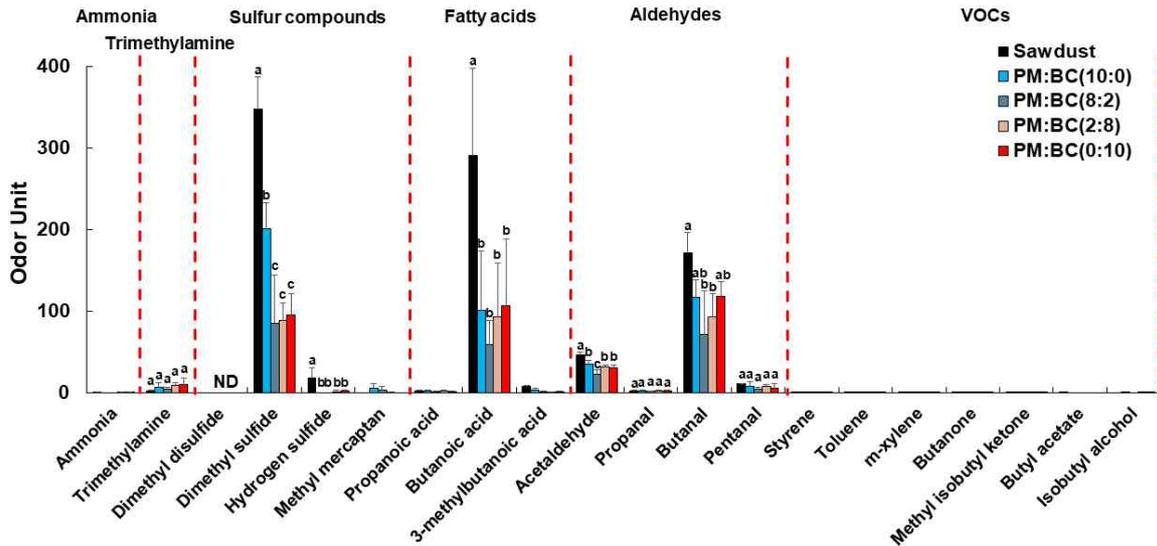


Fig. 4-53. 혼합 비율별 우분뇨에 대한 지정악취물질 발생 특성.

피트모스와 바이오차를 혼합하여 제조한 혼합 깔짚의 혼합 비율별 지정악취물질의 저감 효율은 Fig. 4-54에서 제시된 바와 같다.

피트모스와 바이오차를 각각 8:2 및 2:8의 비로 혼합한 PM:BC(8:2) 및 PM:BC(2:8) 깔짚은 톱밥, 피트모스 및 바이오차 단일 소재 깔짚보다 전반적으로 더 높은 악취 저감 효율을 보였다. PM:BC(8:2) 깔짚의 경우, 악취 저감 효율이 PM:BC(2:8) 깔짚에 비해 더 높게 나타났으며, 이는 피트모스와 바이오차를 8:2로 혼합하였을 때 바이오차 첨가로 인한 악취 저감 상승 효과가 뛰어났기 때문이다.

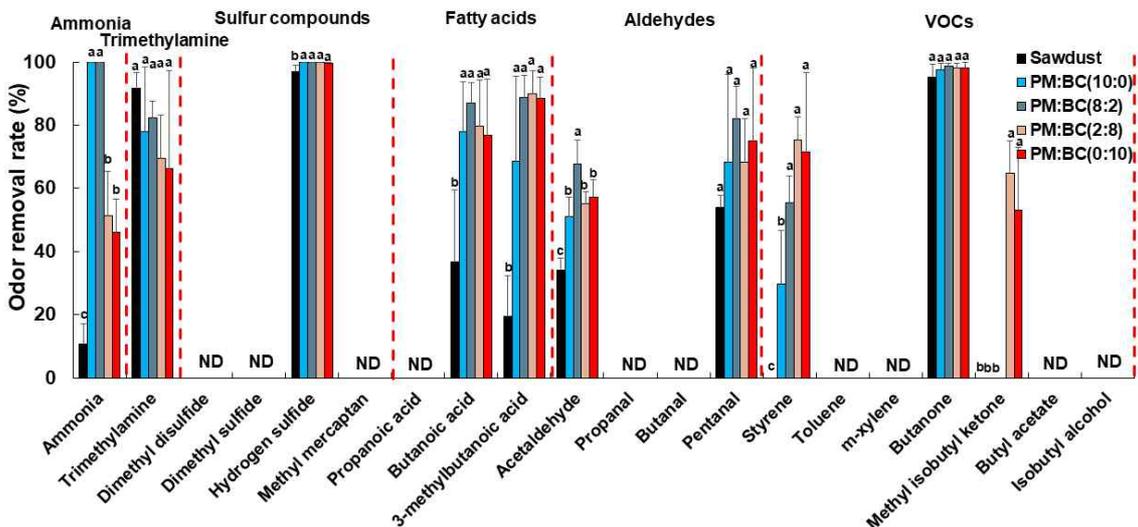


Fig. 4-54. 혼합 비율별 우분뇨에 대한 지정악취물질 저감 효율.

복합적인 악취 발생량 및 저감 효율을 평가하기 위하여 악취 성분 각각의 발생량을 합하여 총 Odor Unit을 도출하였으며, 각각에 대한 악취 저감 효율을 확인하였다 (Fig. 4-55). 개별 악취의 기여도를 고려한 복합 악취 개념의 Odor Unit에 대한 저감 효율은 PM:BC(8:2) (79.9%) > PM:BC(2:8) (74.0%) > PM:BC(0:10) (70.7%) > 톱밥 (29.2%) 순으로 높았으며, 피트모스와 바이오차를 8:2로 혼합한 PM:BC(8:2) 깔짚은 79.9%의 악취를 저감하는 뛰어난 악취 저감 효율을 보유한 효과적인 악취 저감용 깔짚 소재임을 확인하였다.

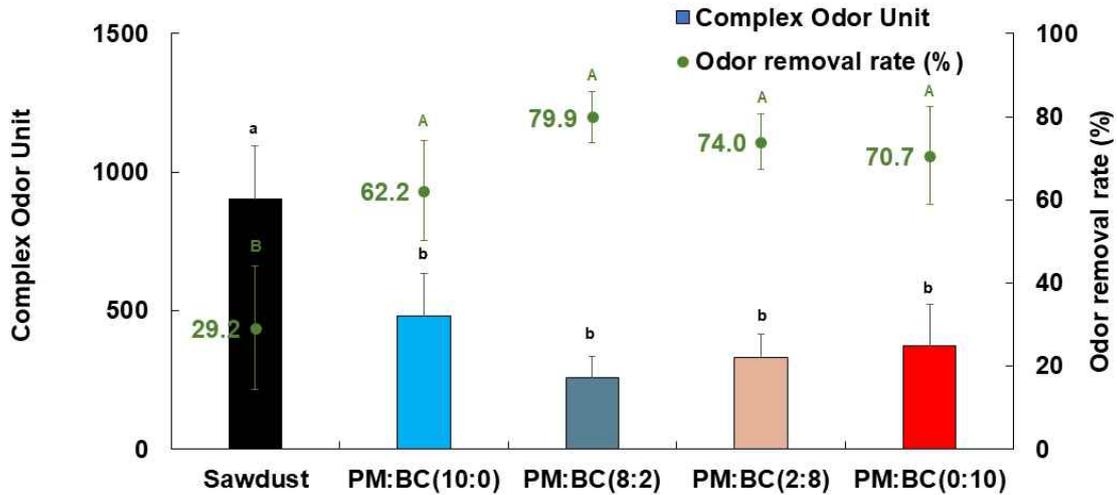


Fig. 4-55. 혼합 비율별 우분뇨에 대한 복합 악취 발생량 및 악취 저감 효율.

(3) 개발된 깔짚 소재 적용 축사내 부숙화 단계 검증(1단계 퇴비화)

(가) 조건 실험이 가능한 축산농가 선정

① 강원도 횡성군 한우 농가

개발된 깔짚 소재 적용 축사 내 부숙화 단계 검증을 위하여 강원도 횡성군의 한우 농가 3곳의 협조를 얻어 실험하고자 하였으며, 2022년 3월 강원도 횡성군의 한우 농가 3개소에 방문하여 축사 및 퇴비사 등 현장을 확인하였다.

내가 이루는 도시, 꿈을 이루는 횡성



횡성군농업기술센터



수 신 경상국립대학교 농업생명과학대학(환경생명화학과 서동철 교수) 귀
 증 (경유)

제 목 2022년 바이오차 활용 우사깔짚 퇴비자원화 실증시험 관련 현장방문
 요청

1. 농촌진흥청 농촌지도사업 시행계획 및 농업기술센터-2128(2022. 3. 2.)호의 계획임.
 2. 2022년도 기술보급 블렌딩 협력모델 R&D사업 추진에 따른 횡성한우 탄소저장 우분 깔짚 퇴비자원화 생산기반 구축 세부사업으로 "바이오차 활용 우사깔짚 퇴비자원화 현장 실증시험"을 전문가와 협력하여 추진하고자 아래와 같이 사전 현장방문을 요청 하오니 협조하여 주시기 바랍니다.

가. 일 시: 2022. 3. 18.(금) 13:00 ~

나. 초빙전문가: 서동철 교수팀(경상국립대학교 환경생명화학과)

다. 현장방문: 4개소, 4농가

- 횡성읍 옥동리 농가 (횡성한우 사육농가)
- 우천면 하대리 농가 (횡성한우 사육농가)
- 우천면 법주리 농가 (횡성한우 사육농가)
- 갑천면 전촌리 농가 (횡성한우 사육농가)

라. 주요내용: 바이오차 깔짚 실증 참여농가 사전교육 및 현장 기초조사 등

횡성군농업기술센터 

㉔ 실증포 1 (강원도 횡성군 우천면 하대길)



Fig. 4-56. 강원도 횡성군 우천면 하대길 축사 위성사진.





Fig. 4-57. 강원도 횡성군 우천면 하대길 축사 전경.

㉞ 실증포 2 (강원도 횡성군 갑천면 외갑천로)



Fig. 4-58. 강원도 횡성군 갑천면 외갑천로 축사 위성사진.



Fig. 4-59. 강원도 횡성군 갑천면 외갑천로 축사 전경.

㉔ 실증포 3 (강원도 횡성군 우천면 법주리)



Fig. 4-60. 강원도 횡성군 우천면 법주리 축사 위성사진.





Fig. 4-61. 강원도 횡성군 우천면 법주리 축사 전경.

② 경상남도 사천시 한우 농가

개발된 깔짚 소재 적용 축사 내 부숙화 단계 검증을 위하여 경상남도 사천시의 한우 농가 1개소의 협조를 얻어 실험하고자 하였다. 2022년 7월 경상남도 사천시의 한우 농가에 방문하여 축사 및 퇴비사 등 현장을 확인하였다.

㉔ 실증포 (경상남도 사천시 사남면 송암길)



Fig. 4-62. 경상남도 사천시 사남면 송암길 축사 위성사진.

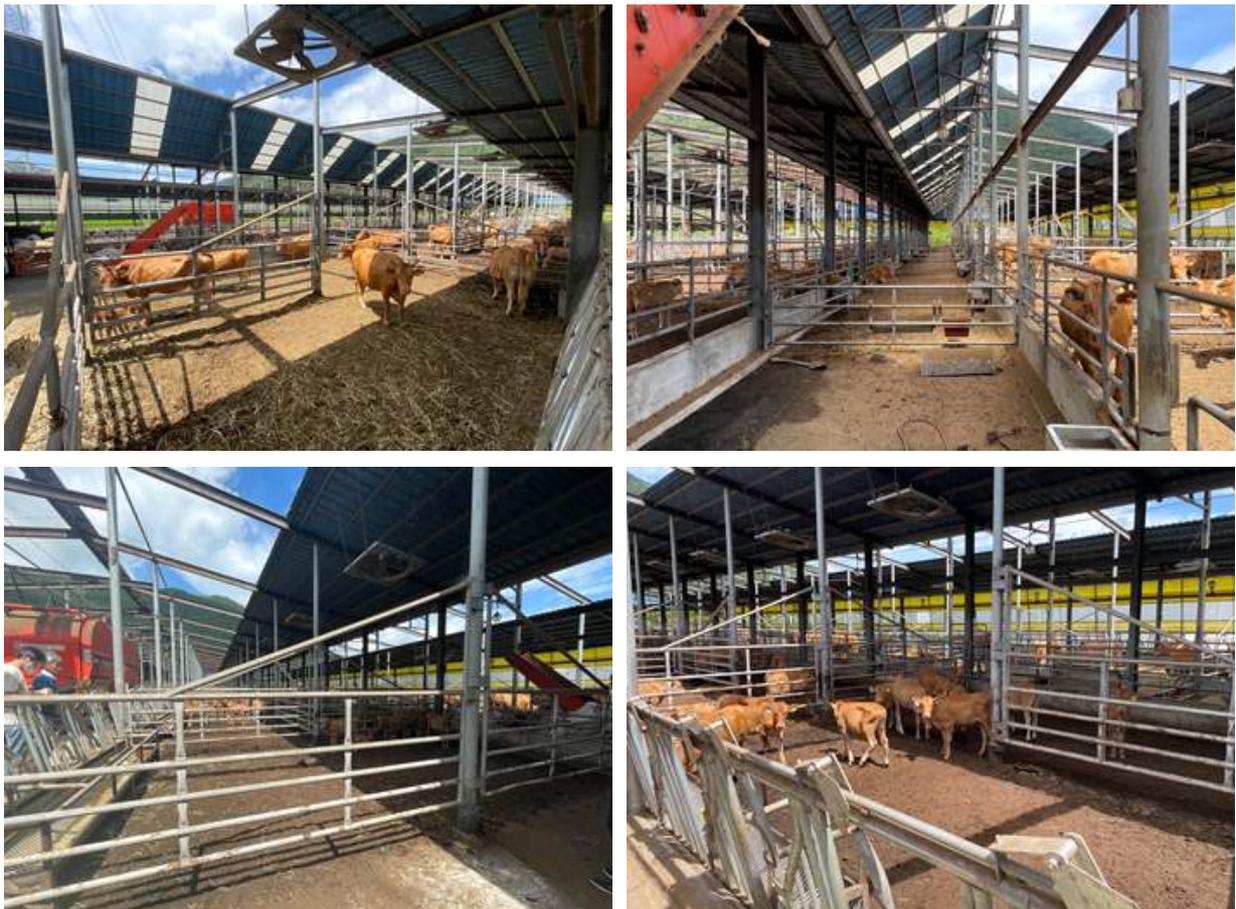




Fig. 4-63. 경상남도 사천시 사남면 송암길 축사 전경.

③ 경기도 안성시 오리 농장

개발된 깔짚 소재 적용 축사 내 부숙화 단계 검증을 위하여 경기도 안성시의 오리 농장 1개소의 협조를 얻어 실험하고자 하였다. 2022년 10월 경기도 안성시의 오리 농장에 방문하여 축사 및 퇴비사 등 현장을 확인하였다.

㉔ 실증포 (경기도 안성시 일죽면 월정리)



Fig. 4-64. 경기도 안성시 일죽면 월정리 축사 위성사진.





Fig. 4-65. 경기도 안성시 일죽면 월정리 축사 전경.

④ 충청북도 음성군 오리 농장

개발된 깔짚 소재 적용 축사 내 부숙화 단계 검증을 위하여 충청북도 음성군의 오리 농장 1개소의 협조를 얻어 실험하고자 하였다. 2022년 10월 충청북도 음성군의 오리 농장에 방문하여 축사 및 퇴비사 등 현장을 확인하였다.

㉠ 실증포 (충청북도 음성군 삼성면 청용리)



Fig. 4-66. 충청북도 음성군 삼성면 청용리 축사 위성사진.





Fig. 4-67. 충청북도 음성군 삼성면 청용리 축사 전경.

(나) 개발된 깔짚을 적용한 후 입식 및 사육

강원도 횡성군 우천면 하대길 축사에 깔짚 18포를 전달하였으며, 2022년 12월부터 깔짚을 축사에 투입하고 사육하였다.



<상차 사진>



<하차 사진>

Fig. 4-68. 강원도 횡성군 우천면 하대길 축사 개발된 깔짚 상차 및 하차 사진.

강원도 횡성군 갑천면 외갑천로 축사에 깔짚 18포를 전달하였으며, 2022년 12월부터 깔짚을 축사에 투입하고 사육하였다.



<상차 사진>



<하차 사진>

Fig. 4-69. 강원도 횡성군 갑천면 외갑천로 축사 개발된 깔짚 상차 및 하차 사진.

강원도 횡성군 우천면 법주리 축사에 깔짚 18포를 전달하였으며, 2022년 12월부터 깔짚을 축사에 투입하고 사육하였다.



<상차 사진>



<하차 사진>

Fig. 4-70. 강원도 횡성군 우천면 법주리 축사 개발된 깔짚 상차 및 하차 사진.

경상남도 사천시 축사에 깔짚을 전달하였으며, 2022년 7월 17일에 기존에 사용하던 깔짚의 교체 시기가 만료되어 개발된 깔짚을 축사에 투입하여 한우를 사육하였다.



<상차 및 하차 사진>



<사육 사진>

Fig. 4-71. 경상남도 사천시 사남면 송암길 축사 개발된 깔짚 상차, 하차 및 사육 사진.

경기도 안성시 축사에 깔짚 20포를 전달하였으며, 기존에 사용하던 깔짚의 교체 시기가 만료되어 2022년 10월 13일부터 개발된 깔짚을 축사에 투입하고 오리를 사육하였다.



<하차 사진>

Fig. 4-72. 경기도 안성시 일죽면 월정리 축사 개발된 깔짚 하차 사진.

충청북도 음성군 축사에 깔짚 11포를 전달하였으며, 기존에 사용하던 깔짚의 교체 시기가 만료되어 2022년 10월 18일부터 개발된 깔짚을 축사에 투입하고 오리를 사육하였다.



<하차 사진>

Fig. 4-73. 충청북도 음성군 삼성면 청용리 축사 개발된 깔짚 하차 사진.

(다) 개발된 깔짚 적용 축사 모니터링

강원도 횡성군 축사는 개발된 깔짚이 아직 투입되지 않아 톱밥을 깔짚으로 사용을 하고 60일간 한우를 사육한 축사의 우분뇨를 샘플링하여 이화학적 특성 및 부숙화 단계를 검증한 결과는 Table 4-57에서 보는 바와 같다.

60일간 사육한 축사의 우분뇨의 수분함량은 하대길, 외갑천로 및 법주리 축사에서 각각 68.5, 58.4 및 66.5%로 수분 흡수가 많이 이루어졌으며, 톱밥의 형태는 보이지 않고 우분뇨만 보이는 상태였다. As, Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, Cr, Hg 등의 유해물질은 농촌진흥청 비료 규정규격으로 고시된 가축분 퇴비의 기준을 만족하는 수치로 확인되었다.

부숙도 검증 결과 부숙 완료 기준인 발아지수 70에 도달하지 못하여 미부숙으로 확인되었다.

Table 4-57. 강원도 횡성군 축사 내 우분뇨의 이화학적 특성 및 부숙도 검증

항목	단위	하대길	외갑천로	법주리
수분		68.5	58.4	66.5
유기물		84.6	83.1	84.9
염분	%	1.69	0.54	0.45
염산불용해물		0.22	0.88	0.39
T-N		0.30	0.55	0.39

K		4457.0	8751.2	6876.2
Ca		7752.3	8845.6	7031.5
Mg		843.5	2821.1	2770.8
Na		6670.6	1362.6	2299.5
As		0.03	0.19	불검출
Cd		0.06	0.07	0.08
Pb	mg/kg	6.32	불검출	0.35
Cu		6.89	19.3	11.5
Ni		1.83	0.18	0.19
Zn		62.9	113.7	85.9
Cr		5.11	0.99	1.31
Hg		불검출	1.36	0.73

부숙도	GI	68.1	66.8	63.5

개발된 깔짚 적용으로 인한 축사 내 미생물 군집 변화를 확인하기 위해 강원도 횡성군 축사

내의 우분뇨를 샘플링하여 미생물 군집을 확인하였으며, 강원도 횡성군 축사에 개발된 깔짚을 투입한 후 사육 기간별로 축사 내 우분뇨를 샘플링하여 미생물 군집을 추가적으로 분석해 톱밥 깔짚과 개발된 깔짚의 미생물 군집 변화를 조사할 예정이다. 톱밥 깔짚이 투입되고 60일 후의 미생물 군집은 Fig. 4-74에서 보는 바와 같다.

강원도 횡성군 하대길, 외갑천로 및 법주리 우사 내의 미생물 군집 분포는 유사하였으며 Bacteroidetes > Firmicutes > Proteobacteria > Tenericutes 순으로 약 20종의 미생물 군집이 분포되어 있었으며, 1% 미만의 미생물 군집 분포는 축사 환경에 따라 다르게 나타났다.

일반적인 토양의 미생물 군집은 Proteobacteria > Acidobacteria > Bacteroidetes > Gemmatimonadetes > Verrucomicrobia 순으로 40여 종의 미생물 군집이 분포되어 있었으며 우사 내 우분뇨에 존재하는 미생물이 분포하고 있었지만 미생물 군집 분포와 큰 차이가 났다. 3차년도에 재배시험을 수행할 때, 톱밥 및 개발된 깔짚이 적용되어 생산된 퇴비의 적용에 따른 토양 내 미생물 군집 분포를 확인하고 개발된 깔짚이 적용된 퇴비가 토양 내 유용미생물의 분포의 증진에 기여할 수 있는지 평가할 예정이다.

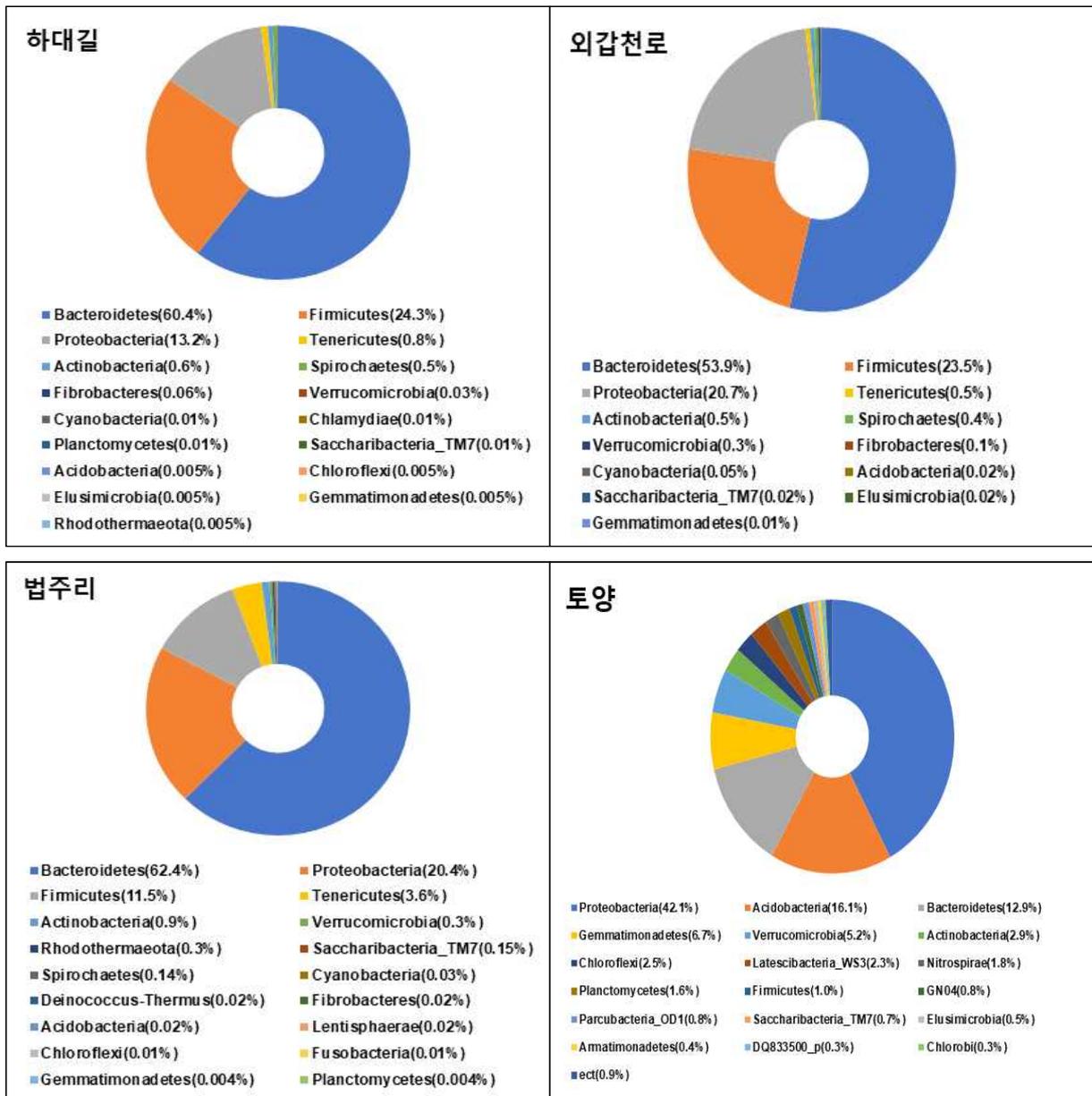


Fig. 4-74. 강원도 횡성군 축사 내 우분뇨의 미생물 군집 및 토양의 미생물 군집

② 경상남도 사천시 한우 농가

축사에 개발된 깔짚 소재를 적용하고 한우 사육 시작 후 4일, 47일, 75일, 103일에 축사를 방문하여 우분뇨를 수집하였으며 사육 기간에 따른 부숙화 단계를 검증하였다.

우분뇨를 수집할 때 축사 내 깔짚 전체를 교반한 것이 아닌 우분뇨가 밀집되어 있는 부분에서 샘플링하여 이화학적 특성 및 부숙도 검증을 수행하였으며, 결과는 Table 4-58에서 보는 바와 같다.

축사 내 수분함량은 사육 기간이 경과 함에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며 유해물질은 가축분 퇴비 기준에 만족하여 중금속에 대한 안정성은 문제없을 것으로 판단된다. 부숙도 검증 결과 초기에 분뇨가 많이 배출되기 전에는 부숙 완료 기준을 만족하였지만 사육 기간이 증가하면서 부숙 완료 기준에 도달하지 못하여 미부숙으로 확인되었다.

Table 4-58. 경상남도 사천시 축사 내 우분뇨의 사육 기간에 따른 이화학적 특성 및 부숙도 검증

항목	단위	깔짚 투입 후 사육 기간			
		4일	47일	75일	103일
수분		55.8	64.3	68.5	69.1
유기물		76.9	72.7	75.4	82.7
염분	%	0.56	1.11	0.96	0.80
염산불용해물		0.68	0.52	0.65	0.78
T-N		0.34	0.44	0.49	0.55
K		5438.0	6572.1	5452.6	6809.2
Ca		8045.1	8342.6	7785.0	8109.7
Mg		1542.6	2107.0	2443.2	2208.9
Na		2202.6	4379.4	3852.6	3164.3
As		불검출	0.06	0.09	0.23
Cd		불검출	0.05	0.02	0.06
Pb	mg/kg	0.48	1.52	2.65	4.88
Cu		11.5	8.9	15.6	25.7
Ni		0.67	1.53	0.71	0.44
Zn		48.5	97.3	103.2	85.4
Cr		0.89	1.28	2.31	1.10
Hg		불검출	불검출	불검출	불검출
부숙도	GI	73.1	51.8	55.9	63.3

③ 경기도 안성시 및 충청북도 음성군 오리 농장

경기도 안성시 오리 농장과 충청북도 음성군 오리 농장에 각각 10월 13일 및 10월 18일에 개발된 깔짚 투입하였지만 최근 AI의 확산으로 인해 방문이 불가하여 왕겨 깔짚을 장기간 사용 하고 축사 내에 남아있는 계분을 수집하여 이화학적 특성 및 부숙도 검증을 수행한 결과는 Table 4-59에서 보는 바와 같다.

경기도 안성시 및 충청북도 음성군 축사 내 계분의 수분 함량은 각각 55.6 및 59.2%였으며, 염산불용해물은 각각 1.85 및 1.65%였으며, 무기성분 및 유해물질은 가축분퇴비 규격에 부합하였다. 부숙도 검증 결과 장기간 깔짚을 사용하고 방치되어 있어 축사 내에서 부숙화가 일어난 것으로 보이며, 퇴비 부숙 완료 기준인 70을 초과하여 부숙 완료로 판정되었다.

Table 4-59. 경기도 안성시 및 충청북도 음성군 축사 내 계분의 이화학적 특성

항목	단위	경기도 안성시	충청북도 음성군
수분		55.6	59.2
유기물		66.4	75.7
염분	%	0.93	0.60
염산불용해물		1.85	1.65
T-N		0.68	0.26

K		676.5	742.1
Ca		5123.1	5022.4
Mg		1845.6	1985.6
Na		785.4	954.3
As		불검출	불검출
Cd		불검출	불검출
Pb	mg/kg	불검출	불검출
Cu		23.8	11.8
Ni		불검출	불검출
Zn		67.4	85.3
Cr		불검출	불검출
Hg		불검출	불검출

부숙도	GI	72.10	102.8

(4) 가축분뇨 혼합된 깔짚의 축사와 퇴비사 연계방안 확립

(가) 상기 선행연구 결과를 적용하여 축사에서 퇴비사로 가축분뇨 혼합된 깔짚의 이동 시기 결정

본 연구의 핵심연구 주제 중 하나는 바이오차 기반 깔짚소재가 적용된 사육시설에서 퇴비사로 연계방안 확립이다. 현재 우사에서 퇴비사로 가축분뇨가 혼합된 깔짚의 이동시기 결정을 위해 사천시 한우 축사를 모니터링 하였으나, 지역별 축사마다 사육환경이 다르기 때문에 한 축산 농가에서 도출된 결과를 모든 축사에 적용하기에는 어려움이 있다. 이에 본 연구진은 바이오차 기반 깔짚소재의 적용성을 확대하기 위하여 추가적으로 다양한 지역별 한우 축사에 소재를 공급하고 축사-퇴비사 연계방안 확립을 위한 실험을 수행하였다. 강원도 횡성군의 축사 3개소에서 개발된 깔짚의 투입하여 깔짚의 이동 시기를 확인한 결과 가축분의 수분함량이 포화되는 시점이 축사의 환경마다 다르기 때문에 정확한 기간을 산정하기에는 어려움이 있으며 깔짚 사용 후 50~90일에 축사에서 퇴비사로 가축분뇨를 이동하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

계사에서의 퇴비사로 가축분뇨가 혼합된 깔짚의 이동시기 결정을 위해 경기도 안성시 및 충청북도 음성군의 오리 농가에 개발된 깔짚을 투입하여 사육을 진행하였지만 AI 바이러스의 확산으로 인해 농가 방문이 불가능하여 지속적인 모니터링을 수행하지 못하여 가축분뇨가 혼합된 깔짚의 이동시기를 결정하기 위해서는 추가적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

(나) 축사에서 퇴비사 적용시 최적환경 조건 구축

① 과도한 수분누적시 추가적인 수분조절재 공급

실증포에서 바이오차 혼합깔짚을 적용한 후 퇴비사로 이동하여 퇴비화를 수행하였으나 과도한 수분누적이 발생하지 않아 퇴비화가 원활이 되었기 때문에 본 연구에서는 추가적인 수분조절재의 공급이 필요하지 않을 것으로 판단하였다. 하지만 실증 농가에 따라 관리 미흡으로 인해 수분이 누적된다면 원활한 퇴비화를 위해 추가적으로 수분조절재를 공급해야할 것으로 판단된다.

② 추가적인 산소공급 필요시 송풍 라인 구축

실증포에서 퇴비화 수행 시 송풍 라인을 구축하지 않고 정치된 상태에서 퇴비화를 하였다. 생산된 퇴비의 품질 검사를 수행한 결과 퇴비 공정규격에 부합하였으며, 본 실증포에서 생산된 퇴비를 이용하여 비해시험 및 재배시험을 수행하였고 퇴비에 의한 피해가 나타나지 않았으므로 추가적인 송풍 라인 구축은 필수는 아닌 것으로 판단된다.

(다) 고품질 퇴비 생산을 위한 퇴비사내 퇴비더미 높이 결정

실증포에서 퇴비화 수행 시 퇴비더미의 높이를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m로 나누어 퇴비화를 진행하였다. 높이가 0.5-1.0 m인 퇴비더미는 온도가 원활히 증가하지 않는 것을 확인하였고 퇴비의 부숙이 잘 되지 않았다. 퇴비더미의 높이가 1.5 m 이상이 되었을 때 퇴비더미의 온도가 빠르게 상승하였고 퇴비의 부숙이 잘 되었기 때문에 퇴비더미의 높이는 1.5 m 이상으로 쌓아서 퇴비화하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

(5) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 환경위해성 평가(2단계 퇴비화)

(가) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 용출성분 및 침출수 평가

① 부숙시기별 용출 성분 및 침출수 분석

본 시험은 퇴비사 내에서 발생하는 침출수를 평가해야 하지만 현재 사천시 축사 내에서 깔짚을 사용하여 사육하고 있으며 퇴비사로 가축분뇨가 혼합된 깔짚을 이동하지 않아 퇴비사 내에서 발생하는 용출 성분 및 침출수를 평가가 불가능한 실정이다. 따라서 개발된 깔짚이 적용된 축사 내 우분뇨를 시기별로 수집하여 우분뇨에서 용출되는 성분을 분석하였다.

개발된 깔짚이 적용된 축사 내 우분뇨의 사육 기간에 따른 용출 성분 분석 결과는 Table 4-60에서 보는 바와 같다. 분석 항목은 유출될 시 주변 환경에 위해를 끼칠 수 있는 NO₃-N, SO₄-S 및 PO₄-P로 선정하였으며 NO₃-N의 경우 초기 1253 mg/kg이 용출되었지만 사육 기간이 경과함에 따라 용출량이 감소하여 검출되지 않았다. SO₄-S의 경우 깔짚 투입 후 4일 및 47일에 각각 1164 및 1506 mg/kg이 용출되었고 47일 이후에 기간이 경과 함에 따라 SO₄-S의 용출량이 감소하였다. PO₄-P의 경우 사육 기간이 증가할수록 PO₄-P의 용출량도 증가하는 경향을 보였으며 깔짚 투입 후 103일에 4215 mg/kg이 용출되었다.

Table 4-60. 경상남도 사천시 축사 내 우분뇨의 용출 성분

항목	단위	깔짚 투입 후 사육 기간			
		4일	47일	75일	103일
NO ₃ -N		1253	불검출	불검출	54
SO ₄ -S	mg/kg	1164	1506	879	423
PO ₄ -P		2316	3565	3772	4215

(나) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 배출되는 온실가스 분석

① 부숙시기별 온실가스 배출특성

본 시험은 실증포에 축사바닥 깔짚 소재를 적용한 후 퇴비사로 이동하여 퇴비사 내에서 배출되는 온실가스를 조사한 결과는 Fig. 4-75에서 보는 바와 같다. 퇴비화 과정 중 온실가스는 퇴비화 초기에만 집중적으로 배출되는 것을 확인하였으며, N₂O의 경우 퇴비화 5일차에만 검출되고 이후로는 검출되지 않았다. CO₂는 퇴비화 모든 기간 동안 검출되었지만 퇴비화 초기 이후에는 배출량이 적었다. CH₄는 퇴비화 20일까지만 배출되었으며 이후로는 배출되지 않았다.

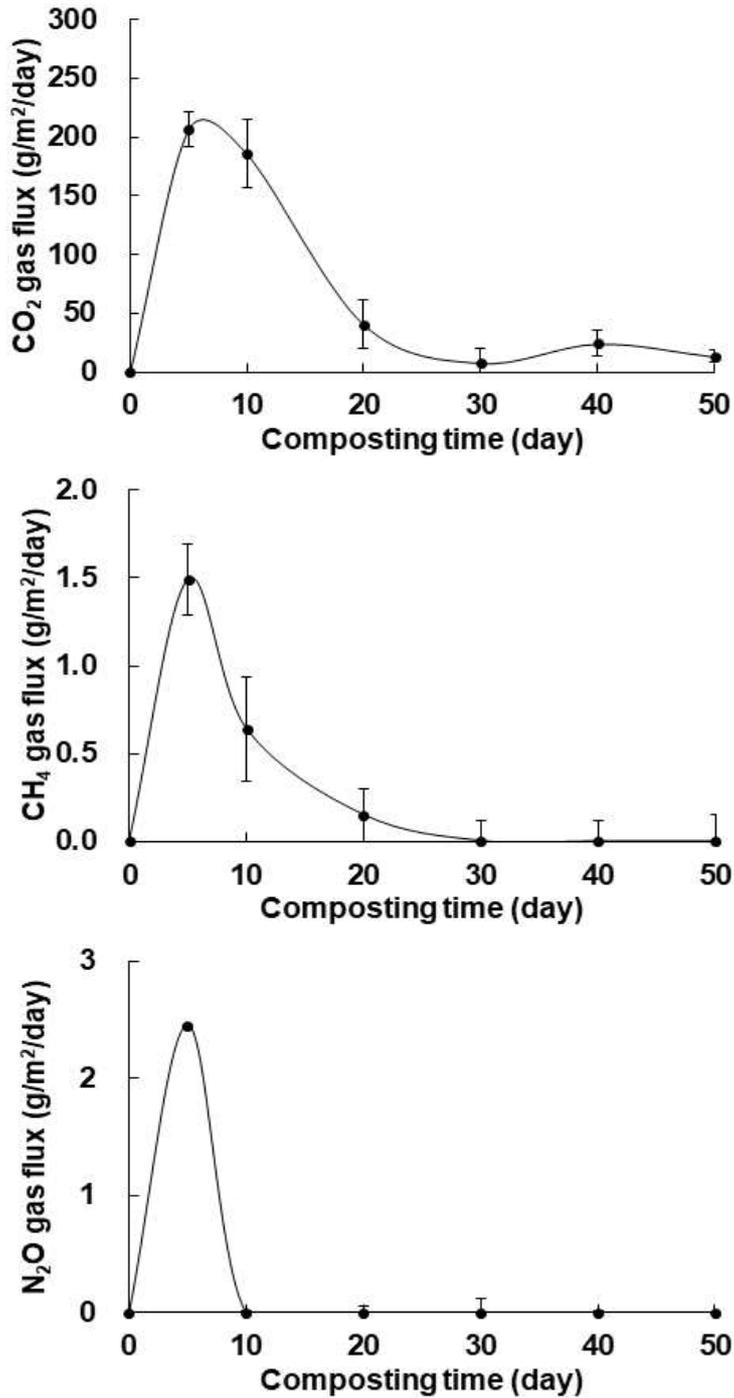


Fig. 4-75. 퇴비화 과정에서 부숙시기별 온실가스 배출 특성.

(다) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 중 배출되는 악취성분 분석

① 부숙시기별 악취성분 배출 특성

본 시험은 퇴비사 내에서 퇴비화 과정 중에 배출되는 악취 성분을 평가해야 하지만 현재 퇴비사로 가축분뇨가 혼합된 깔짚을 이동하지 않아 퇴비화 과정 중에 배출되는 악취 성분 평가가 불가능한 실정이다. 따라서 강원도 횡성군의 축사에 방문하여 톱밥이 깔짚으로 사용되고 있는 축사 내에서 발생하는 악취 성분과 경상남도 사천시의 축사에 개발된 깔짚을 투입하고 사육 시기별 축사 내에서 발생하는 악취 성분 및 경기도 안성시와 충청북도 음성군의 왕겨를 깔짚으로 사용하여 오리 농장 축사 내에서 발생하는 악취 성분을 평가하였으며 악취 성분 분석 결과를 Fig. 4-76 및 4-77에 나타내었다. 퇴비화 과정 중 배출되는 온실가스 모니터링은 축사 내 사용 중인 깔짚을 퇴비사로 이동 즉시 수행할 예정으로 이번년도 연구과제가 종료되는 시점 까지 결과를 도출할 예정이다.

톱밥이 깔짚으로 사용되고 한우를 60일간 사육한 강원도 횡성군 축사 내에서의 악취 발생량은 Fig. 4-76에 나타내었다. 악취는 trimethylamine, dimethyl sulfide, hydrogen sulfide, butanoic acid, acetaldehyde 및 pentanal 성분이 주로 발생되었으며, ammonia 및 VOCs는 거의 배출되지 않았다.

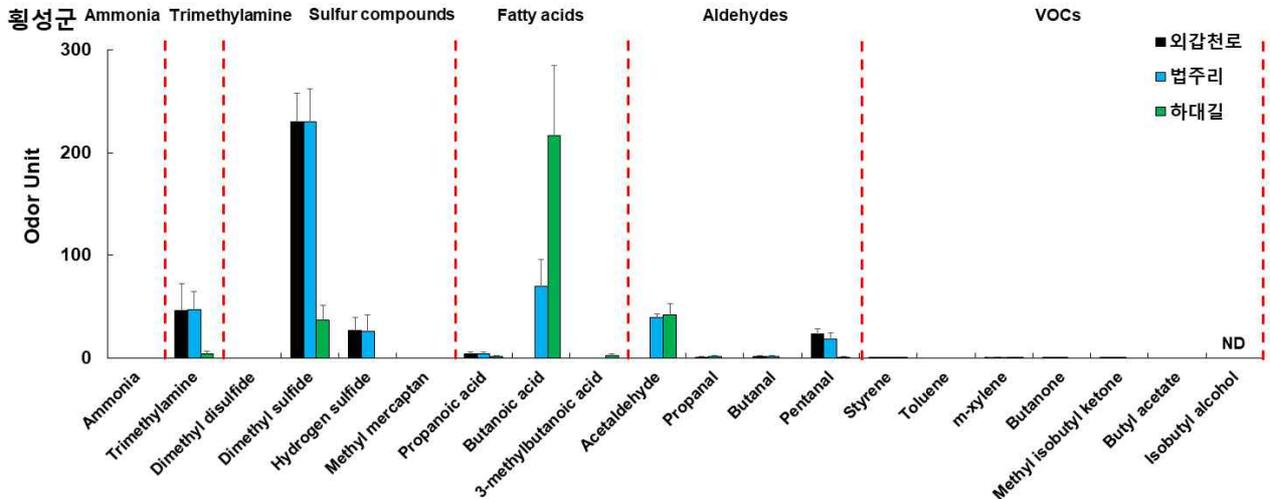


Fig. 4-76. 강원도 횡성군 한우 축사 내 악취 발생량.

개발된 깔짚을 우사에 투입하고 사육 기간에 따른 악취 발생 특성을 평가한 결과는 Fig. 4-77에 나타내었으며, 경상남도 사천시 한우 농가에서 시료를 수집하였다. 깔짚 투입 후 초기에는 trimethylamine, dimethyl disulfide, dimethyl sulfide, butanoic acid, acetaldehyde, propanal, butanal 및 pentanal 성분이 주로 검출되었다. 깔짚 투입 47일 후에는 trimethylamine 및 pentanal 2 종류의 성분이 주로 발생하였다. 깔짚 투입 103일 후에 dimethyl sulfide, hydrogen sulfide, methyl mercaptan, butanal 및 pentanal 성분이 주로 검출되었다. 사육 기간 중 VOCs는 거의 발생되지 않았으며, 악취의 주 원인 성분인 hydrogen sulfide는 사육 기간이 경과하여 분뇨가 어느 정도 쌓여야 발생하는 것으로 판단되었다.

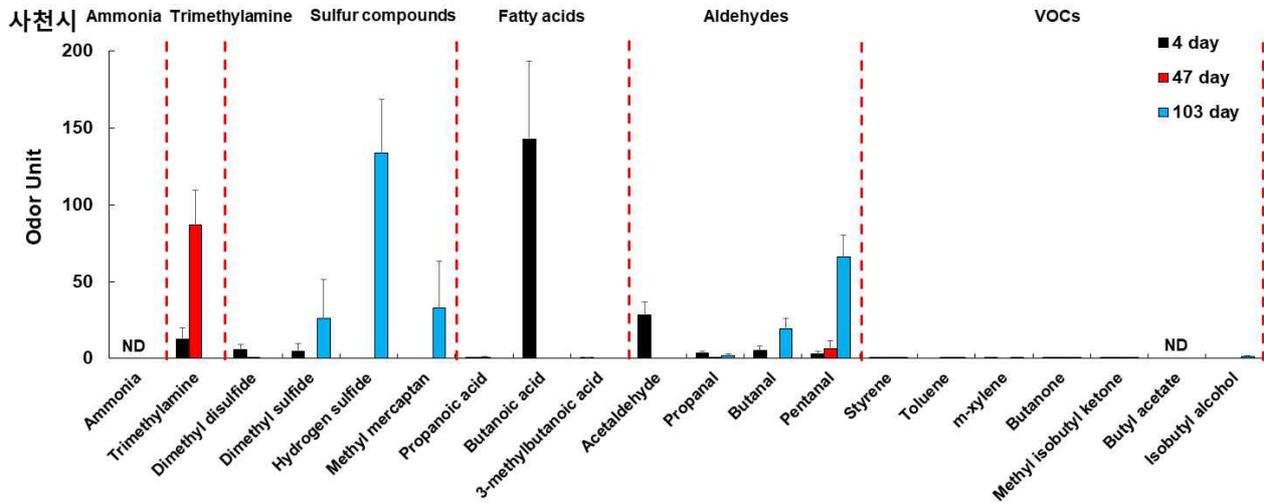


Fig. 4-77. 경상남도 사천시 한우 축사 내 사육 기간에 따른 악취 발생량.

왕겨가 깔짚으로 사용되고 오리를 장기간 사육한 경기도 안성시 축사 내에서의 악취 발생량은 Fig. 4-78에서 보는 바와 같다. 경기도 안성시 오리 농가의 축사에서는 trimethylamine, dimethyl disulfide, dimethyl sulfide, hydrogen sulfide, methyl mercaptan, propanoic acid, 3-methylbutanoic acid, propanal, butanal 및 pentanal 등의 trimethylamine, sulfur compounds, fatty acids 및 aldehydes 유형의 많은 종류의 악취가 검출되었고, ammonia 및 VOCs는 거의 검출되지 않았다.

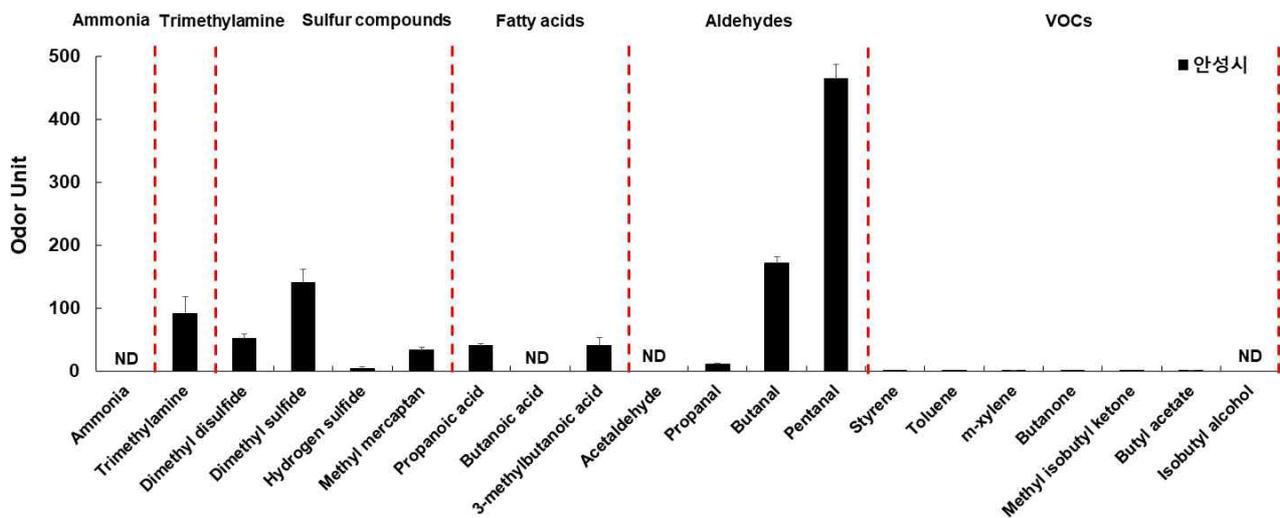


Fig. 4-78. 경기도 안성시 오리 축사 내 악취 발생량.

왕겨가 깔짚으로 사용되고 오리를 장기간 사육한 충청북도 음성군 축사 내에서의 악취 발생량은 Fig. 4-79에서 보는 바와 같다. 충청북도 음성군 오리 농가의 축사에서는 trimethylamine, dimethyl sulfide, hydrogen sulfide, 3-methylbutanoic acid, acetaldehyde, butanal 및 pentanal 등의 trimethylamine, sulfur compounds, fatty acids 및 aldehydes 유형의 많은 종류의 악취가 검출되었고, ammonia 및 VOCs는 거의 검출되지 않았다.

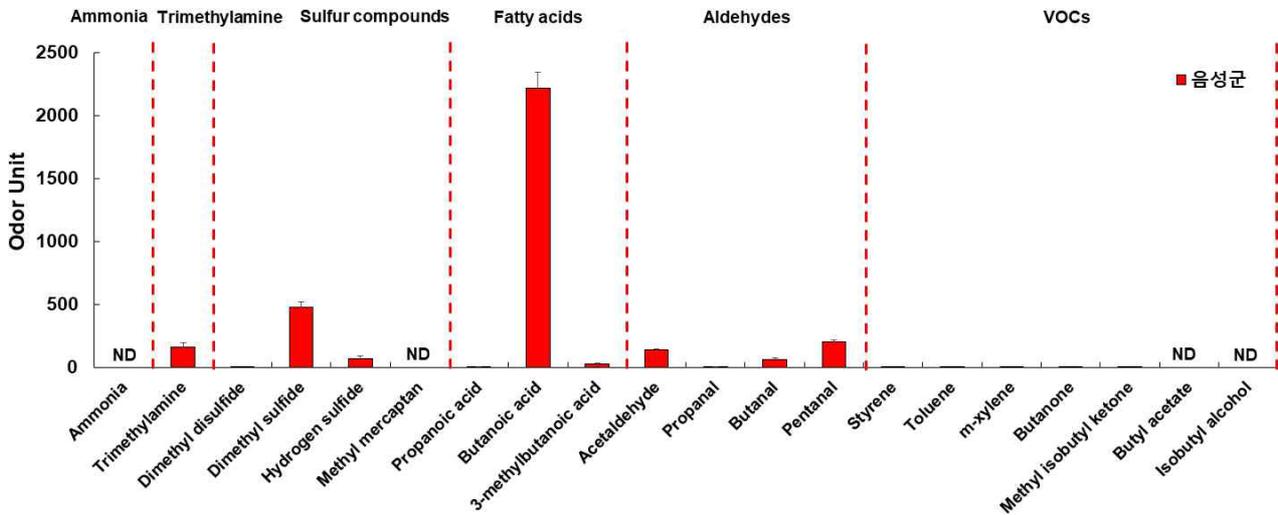


Fig. 4-79. 충청북도 음성군 오리 축사 내 악취 발생량.

(라) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비화 과정 질소 손실률 평가

① 부숙시기별 질소 함량 및 중량 분석

개발된 깔짚이 적용된 가축분뇨의 퇴비화 과정 중 질소의 함량은 지속적으로 증가하는 경향을 보였는데, 이는 가축분뇨 내에 함유되어있는 수분이 증발되면서 비교적 질소의 함량이 증가하게 되는 것으로 판단된다. 퇴비화 과정 중 퇴비의 중량은 수분의 증발 및 유기물의 발효 등으로 인해 지속적으로 감소하는 경향을 보였다.

(6) 축사바닥 깔짚 소재 적용 친환경 가축분뇨 퇴비화 시스템 개발

(가) 상기 3-가-2)-가) 항 중 기준을 초과하는 물질에 대한 저감 방안 수립

계사 환경을 유사하게 모사하여 사육 기간 및 퇴비화 과정의 모니터링을 수행하였을 때, 농촌진흥청 고시 비료공정규격에 고지된 가축분 퇴비의 기준을 초과하는 물질이 없었기 때문에 추가적인 저감 방안 수립은 필요하지 않을 것으로 판단된다.

(나) 상기 3-가-2)-가) 항 중 기준을 초과하는 물질을 저감하기 위한 시스템 변경

축사에서 사육 기간 및 퇴비화 과정의 모니터링을 수행하였을 때, 농촌진흥청 고시 비료공정규격에 고지된 가축분 퇴비의 기준을 초과하는 물질이 없었기 때문에 기준을 초과하는 물질을 저감하기 위한 시스템 변경은 필요하지 않은 것으로 판단된다.

(다) 고기능성 및 고품질 친환경 퇴비생산을 위한 깔짚 소재 보완 및 퇴비화 시스템 개발

고기능성 및 고품질 친환경 퇴비생산을 위해서 깔짚 입자 크기를 일정 크기 이상으로 제조하여 적용하게 된다면, 퇴비화 시 통기성을 향상시킬 수 있을 것이고 고품질 바이오차의 기능성을 더욱 부각시킬 수 있을 것으로 판단된다.

나) 축사바닥 깔짚 우사 및 계사용 깔짚 소재 생산, 제조공정 개발 및 표준화 기술 개발

(1) 우사 및 계사 깔짚 소재 제조공정 및 대량생산 공정 개발

(가) 미생물 종류별 미생물+쌀겨 공정 확립

먼저 축사 내 깔짚 소재에 투입되는 쌀겨의 물리화학적인 특성을 분석하였으며, 그 결과는 Table. 4-61와 같다. 쌀겨의 pH는 6.85로 나타났으며, 일반적인 미생물의 최적 pH는 중성에 가깝기 때문에 쌀겨에서 미생물 활성이 높을 것으로 보인다. 전기전도도(EC) 또한 0.412 dS/m로 염에 의한 미생물의 생육 저해가 일어나지 않을 것으로 판단된다. 탄소와 질소의 함량은 각각 53.33%, 1.70%로 확인되었으며, 쌀겨는 미생물 생육에 필수적인 탄소원과 질소원의 역할을 할 수 있을 것이다. 그 외 무기성분인 P, K, Mg, Ca, Na 등도 쌀겨에 존재하는 것이 확인되었다. 따라서 쌀겨는 미생물 생육에 적합한 소재로 사용될 수 있을 것으로 판단하였다.

Table 4-61. 쌀겨의 물리화학적 특성

Sample	pH	EC	Bulk density	Water	C	N	C/N ratio
	(1:10)	dS/m	g/cm ³	----- (%) -----			-----
쌀겨	6.85	0.412	0.501	10.467	53.33	1.70	31.33

Sample	P	K	Mg	Ca	Na	Zn	As	Cu	B	Ni	Pb	Cd	Cr
	--(%)--		----- (mg/kg) -----										
쌀겨	1.68	1.83	8027	412	7.47	39.4	1.18	4.2	2.92	0	0	0	0

현재 쌀겨는 퇴비 부숙과 축사 깔짚으로 활용되고 있으며, 미생물을 쌀겨와 함께 발효시킬 경우 축산 분뇨 악취가 저감된다는 연구가 있다. 쌀겨에서 미생물 생육이 증가할수록 악취 저감 효율도 증가하므로, 쌀겨가 미생물 생육에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 본 연구의 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일 미생물을 사용하였다. 미생물을 배양하기 위한 배지는 질소원과 무기성분만이 존재하는 배지, 즉 탄소원이 존재하지 않는 배지를 사용하였으며, 배지에 탄소원 역할을 할 수 있는 쌀겨를 0, 0.5, 1, 1.5 및 2%로 다르게 첨가하였다. 쌀겨 함량에 따른 미생물의 생육은 모든 미생물이 Fig. 4-81과 같이 2%에서 가장 높았으며, 그 다음으로 1.5%, 1% 및 0.5%의 쌀겨를 첨가한 배지 순으로 생육이 높았다. 즉, 쌀겨 함량이 증가함에 따라 미생물의 성장도 함께 증가하였다. 쌀겨를 첨가한 배지는 쌀겨를 첨가하지 않은 배지에 비해 모든 미생물에서 생육이 현저히 높았기 때문에 미생물이 성장하는데 쌀겨를 영양분으로 이용함을 알 수 있다. 다른 연구에서 미강은 미생물 배양에 있어 적합하다고 언급한 바가 있으며, 미강을 이용한 배지에서 미생물이 우수한 성장을 보인다고 하였다.

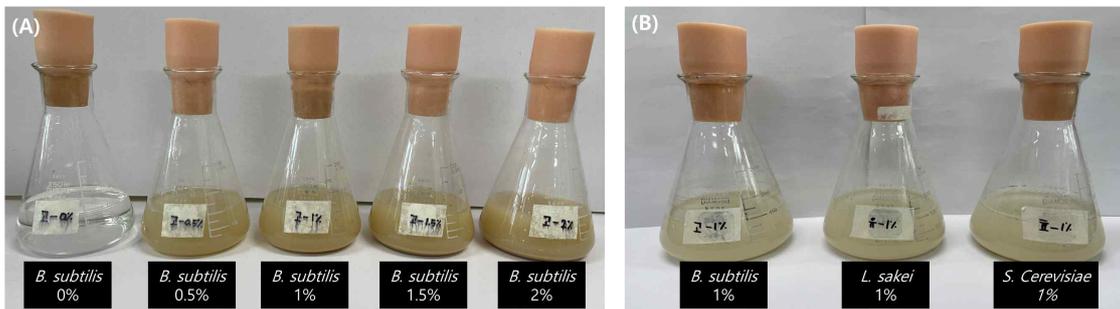


Fig. 4-80. 쌀겨 함량 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);쌀겨함량별, (B);미생물 종류별].

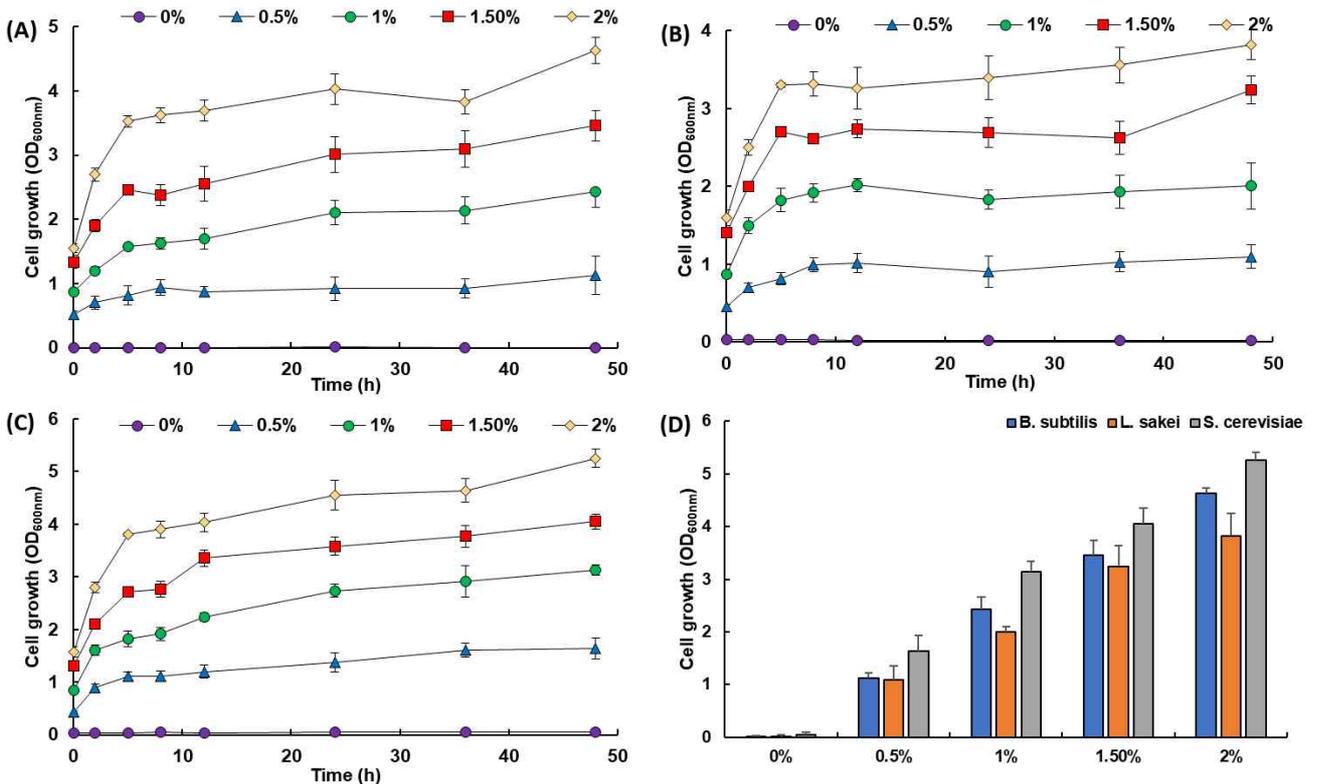


Fig. 4-81. 쌀겨함량 및 미생물 종류별 미생물 생육특성 [(A);쌀겨함량별 *B. subtilis*의 생육, (B);쌀겨함량별 *L. sakei*의 생육, (C);쌀겨함량별 *S. cerevisiae*의 생육, (D);쌀겨함량별 미생물 3종의 생육].

본 연구에서는 쌀겨와 미생물의 혼합 비율이 미생물 생육에 영향을 미치므로, 쌀겨와 미생물의 최적 혼합 비율을 조사하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일 미생물을 사용하였다. 쌀겨와 미생물의 비율을 12:1, 9:1, 6:1 (v/v)로 다르게 하여 30°C, 24시간 발효한 후, 미생물의 생균수 (CFU/g)를 측정하였다(Fig. 4-68~9). *B. subtilis* 균주는 12:1, 6:1, 9:1 순으로 생육이 높았으며, *L. sakei* 및 *S. cerevisiae* 균주는 12:1, 9:1, 6:1 순으로 생육이 높았다. 3종의 미생물 모두 쌀겨:미생물=12:1인 배지에서 생육이 가장 높음을 알 수 있다. 전반적으로 6:1의 혼합비율에서 미생물 생육이 낮은 이유는 미생물에 비해 영양분이 적어 미생물 생육이 제한되기 때문이다.

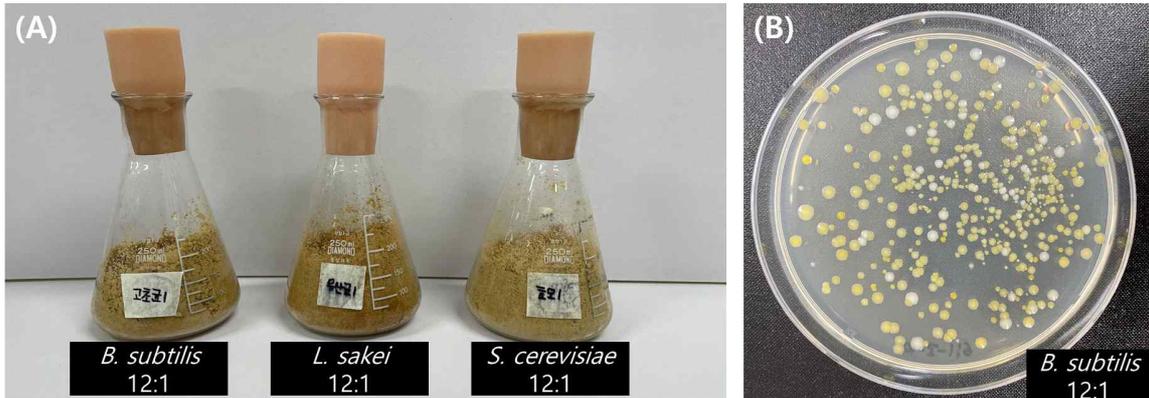


Fig. 4-82. 미생물+쌀겨 비율 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);미생물 종류별 생육 전경; (B);*B. subtilis*의 생육].

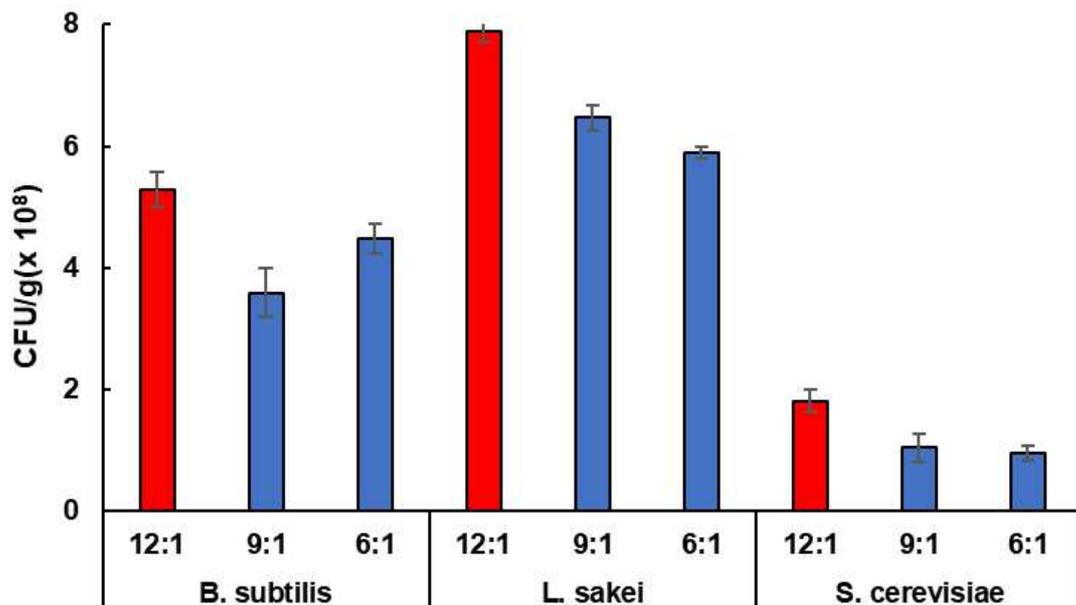


Fig. 4-83. 미생물+쌀겨 비율 및 미생물 종류별 미생물 생육 특성.

(나) 우사 및 계사 깔짚 소재 최적 혼합비율 선정

우사 및 계사에 투입되는 깔짚은 수분 조절과 악취 발생 저감 등 축사 환경을 개선할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 축사에서는 깔짚이 필수적으로 사용된다. 현재 깔짚 제조 공정은 쌀겨에 미생물을 전배양하는 과정이 필요하므로 깔짚 소재 제조에 많은 시간과 노동력이 소요되는 단점이 있다. 따라서 개발된 깔짚이 상용화되기 위해서는 기존보다 간편한 깔짚 제조 기술이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 쌀겨에 미생물을 전배양한 깔짚 (seed)과 미생물을 직접적으로 배양한 깔짚(spray)의 미생물 생육 비교해 보고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일 미생물을 사용하였다. Seed culture와 spray culture에 따른 미생물의 생육 차이를 관찰하기 위해 깔짚에 미생물을 24시간 발효한 후 생균수 (CFU/g)를 측정하였다. 미생물 접종 방식에 따른 미생물의 생육 특성은 Fig. 4-85와 같았다. *B. subtilis* 균주는 seed와 spray culture간의 생육 차이가 크지 않았다. *L. sakei* 및 *S. cerevisiae* 균주는 spray culture에 의한 미생물 생육이 seed culture보다 증가한 모습이다. 일반적으로 미생물의 상태를 활성화하기 위해 seed culture를 수행하는데 본 연구에서 seed culture와 spray culture에서 유의미한 차이가 관찰되지 않았기 때문에 제조 공정이 단순한 spray culture가 깔짚 제조에 적합한 방법이라고 판단하였다.

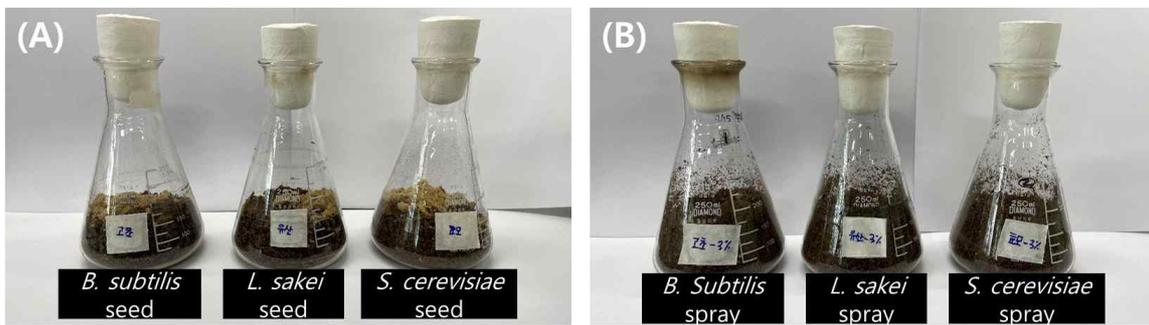


Fig. 4-84. 미생물 접종방법 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);seed culture, (B);spray culture].

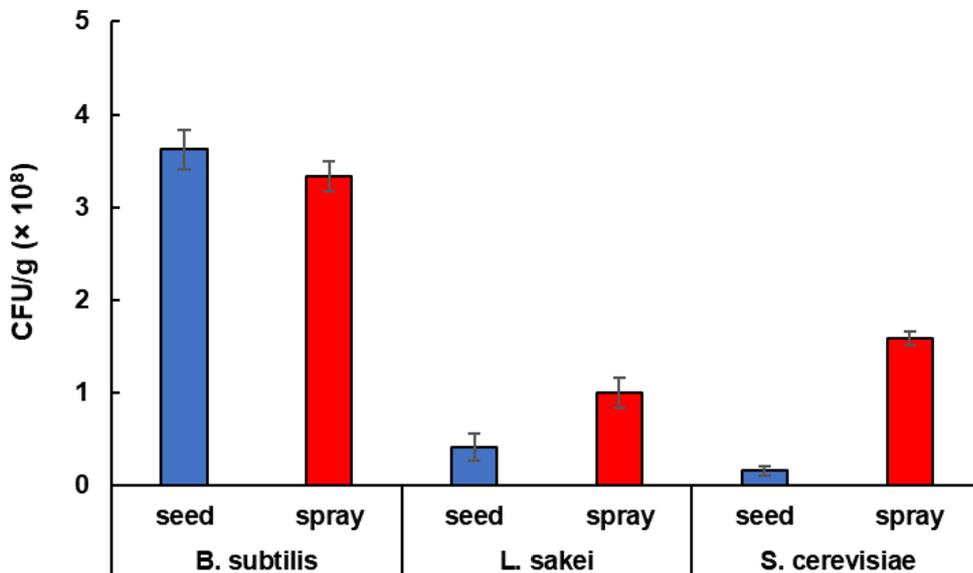


Fig. 4-85. 미생물 접종 방법 및 미생물 종류별 미생물 생육 특성.

깔짚에 spray 되는 미생물의 양은 경제성과 관련되어 있기 때문에 사용되는 미생물 양을 최소화하면서 약취 저감의 효율이 일정 수준으로 유지하고자 하였다. 깔짚 제조 시 많은 양의 미생물을 사용하였을 때 깔짚 제조에 소모되는 비용이 증가하고 미생물 성장이 제한될 수도 있다. 그러므로 깔짚 제조 시 미생물 배양을 위한 최적의 접종 비율을 찾는 것이 중요하다. 본 연구에서는 미생물의 접종 비율을 다르게 하여 깔짚 내 미생물의 생균수를 측정하였으며, 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae* 등 3종의 단일 미생물을 사용하였다. 발효과정은 이전의 실험과 동일하며, 접종 비율에 따른 미생물의 생균수를 측정한 결과는 Fig. 4-86 및 4-87에서 확인할 수 있다. 3종의 미생물 모두 미생물 접종 비율이 증가함에 따라 생균수도 증가하는 경향이 보였다. *B. subtilis*는 3% 및 6% 접종하였을 때 생균수가 $3.3\sim 4.1\times 10^8$ 으로 이 둘 사이는 큰 차이가 보이지 않았지만, 1.5% 접종 시 생균수가 0.6×10^8 로 절반 이상 감소하였다. *L. sakei*는 6%의 접종 비율에서 가장 높은 생균수 (2.8×10^8)를 보여주었으며, 1.5% 및 3% 접종 시 생균수 ($0.6\sim 0.8\times 10^8$)가 감소하였다. *S. cerevisiae*는 1.5-6%로 접종 비율을 다르게 하였음에도 눈에 띄는 생균수 차이가 없었고, $1.6\sim 1.8\times 10^8$ 의 생균수를 유지하였다. 대체적으로 접종되는 미생물양이 감소함에 따라 생균수가 감소하였지만, 이는 미생물에 의한 약취 저감 효과가 저해될 만큼 생균수가 감소한 것은 아니기 때문에 본 연구에서 미생물의 최적 접종비율을 3%로 선정하였다.

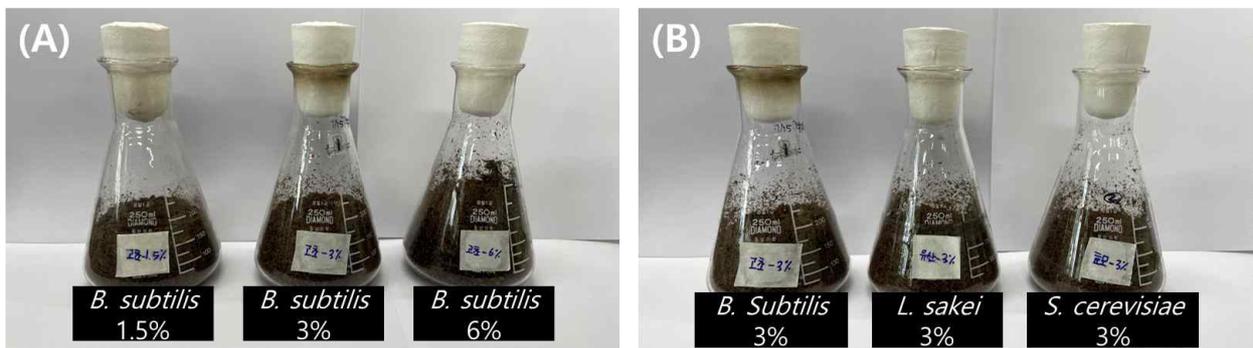


Fig. 4-86. 미생물 접종비율 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);미생물 접종비율별, (B);미생물 종류별].

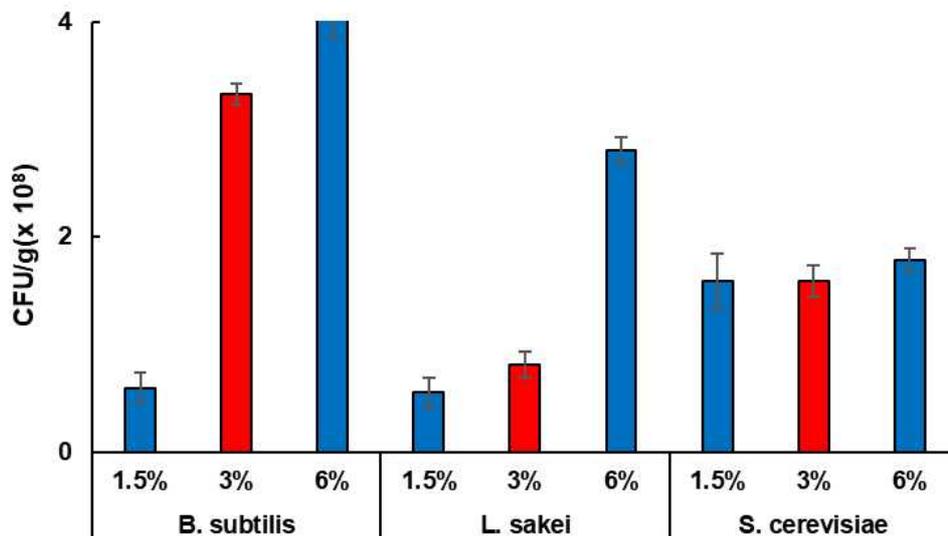


Fig. 4-87. 미생물 접종 비율 및 미생물 종류별 미생물 생육 특성.

축사 깔짚 소재에 따라서 미생물의 생육 특성을 평가하기 위해서 본 연구에서는 깔짚 소재에 따른 미생물의 생균수를 확인하고자 하였다. 미생물은 *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus sakei*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Alcaligenes faecalis* 등 4종의 단일 미생물과 1종의 복합 미생물을 사용하였으며, 깔짚 소재는 왕겨와 바이오차, 피트모스, 피트모스:바이오차 (8:2, 7:3, 6:4)를 이용하였다. 깔짚 소재에 따른 미생물 생육은 Fig. 4-88 및 4-89와 같이 대부분의 미생물 중에서 유사한 경향을 보였는데, 단일 소재 중 왕겨와 바이오차에서 미생물의 생육은 높았지만, 피트모스 내 미생물 생육은 현저히 낮았다. 하지만, *Lactobacillus sakei* 에서는 단일 소재에 비해서 피트모스와 바이오차를 6:4로 혼합한 혼합 깔짚에서 미생물의 생균수가 가장 높았다. 모든 미생물종에서 피트모스와 바이오차 복합소재는 6:4, 7:3, 8:2 순으로 생육이 높았는데 적게는 약 2배, 많게는 10배 이상 차이가 났다. 피트모스의 비율이 증가할수록 생육이 감소하는 경향을 보였는데, 이는 피트모스의 pH가 낮아 미생물의 생장이 저해되기 때문이다. 미생물의 생균수 측면에서 최적의 깔짚 소재를 판단하였을 때 단일 소재에서는 바이오차, 혼합 소재에서는 피트모스와 바이오차를 6:4 비율로 혼합한 것이었다.

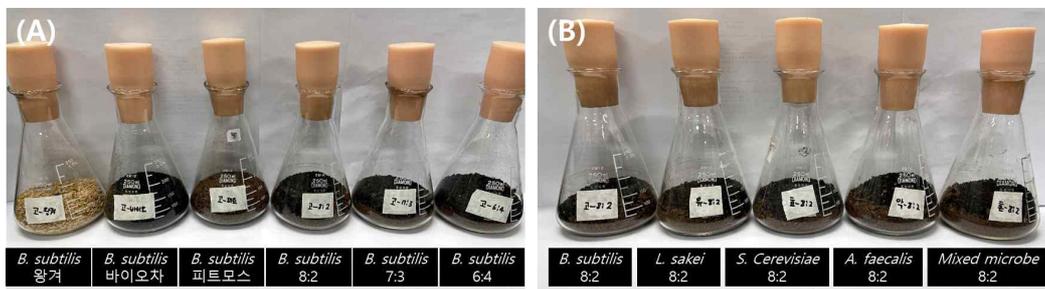


Fig. 4-88. 깔짚 소재 및 미생물 종류별 생육 전경 [(A);깔짚 소재별, (B);미생물 종류별].

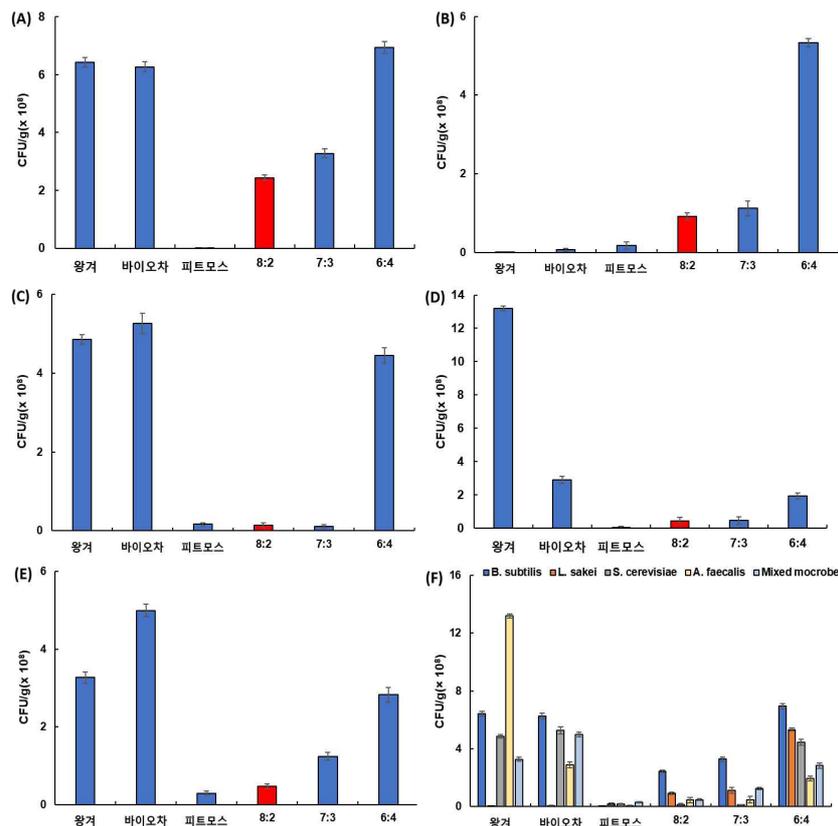


Fig. 4-89. 깔짚 소재 및 미생물 종류별 미생물 생육 특성[(A);*B. subtilis*, (B);*L. sakei*, (c);*S. verevisiae*, (d); *A. faecalis*, (e);Mixed microbe, (f);깔짚 소재별].

미생물의 생균수 측면에서 최적 깔짚은 단일 깔짚을 사용하는 것이었고, 피트모스와 바이오차를 혼합한 혼합 깔짚의 최적 비율은 6:4이었다. 하지만 깔짚의 부숙도, 악취 발생량, 깔짚의 사용량 및 교체 시기 등의 모든 측면에서 고려해 보았을 때 최적 깔짚의 비율 및 이용방법을 선정할 필요가 있다. 이전의 실험에서 깔짚의 부숙도 및 악취 발생량을 분석하였을 때 단일 소재의 깔짚보다는 피트모스와 바이오차를 혼합한 혼합 깔짚에서 부숙도가 높았으며, 악취 발생량도 다른 처리구에 비해서 낮았다. 혼합 깔짚 중에서도 피트모스와 바이오차를 8:2로 혼합한 혼합 깔짚이 부숙도와 악취 발생량 측면에서 최적의 깔짚으로 평가되었다. 수분흡수 속도 및 깔짚의 교체주기 기준으로 최적의 혼합비율을 우분 및 계분으로 나누어서 분석한 결과는 Fig. 4-90와 같다. 우분을 사용하였을 때는 피트모스와 바이오차를 8:2로 혼합하였을 때 수분흡수속도 상수가 0.0581로 가장 높았으며, 깔짚의 교체주기 역시 26일로 7:3 및 6:4 비율보다 길었다. 수분흡수속도 상수는 혼합비율에 따라서 0.0488-0.0581 사이의 범위로 혼합비율에 따라서 차이를 보였지만, 큰 차이는 보이지 않았다. 하지만 깔짚의 교체주기는 6:4 18일, 7:3 20일, 8:2 26일로 처리구에 따라서 최대 8일까지 차이가 났다. 따라서 수분흡수 속도 및 깔짚의 교체주기 측면에서 우사의 깔짚을 위한 최적 혼합비율은 피트모스:바이오차 = 8:2로 평가되었다.

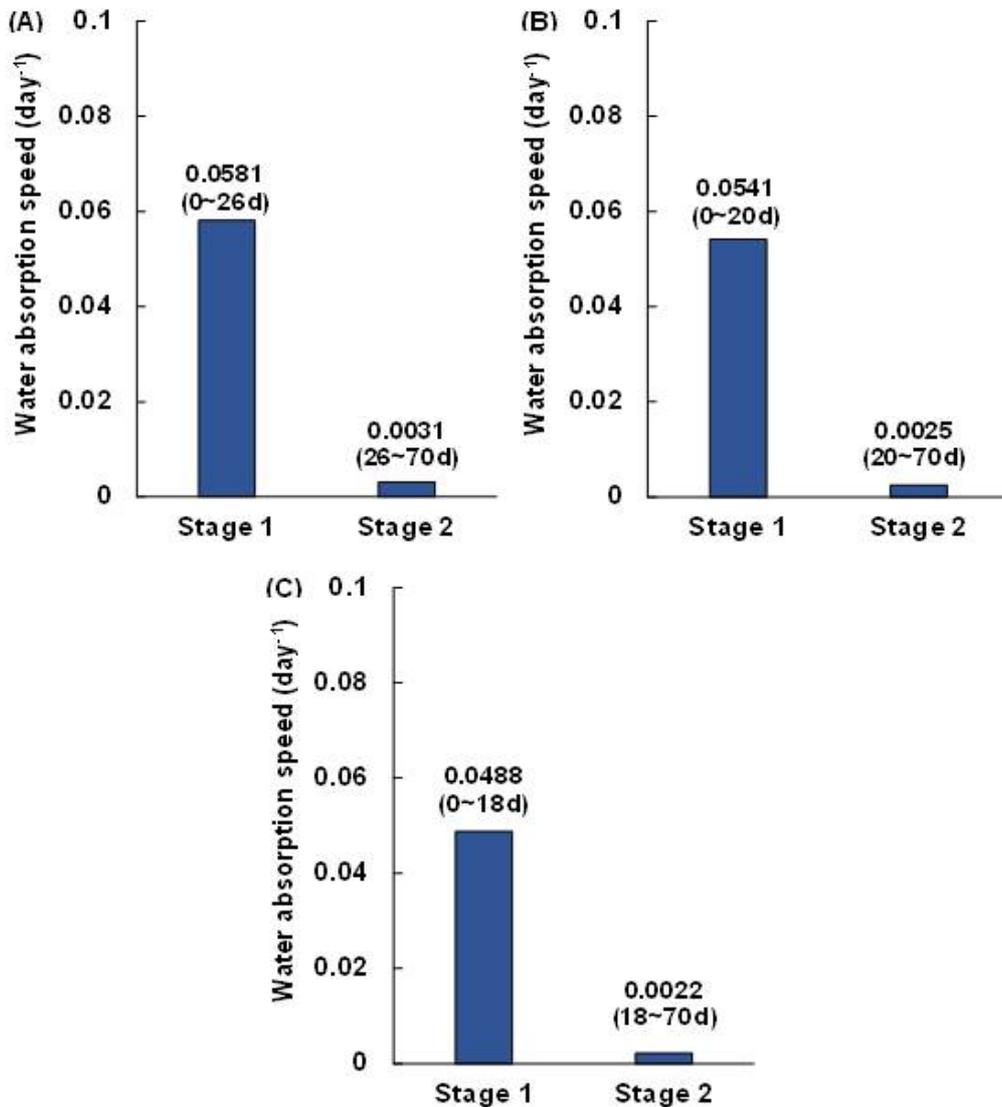


Fig. 4-90. 우분을 사용한 피트모스와 바이오차의 혼합비율에 따른 수분흡수속도 및 깔짚 교체 주기 [피트모스: 바이오차. A; 8:2, B; 7:3, C; 6:4].

계분을 사용하였을 때는 피스모스와 바이오차의 혼합 비율에 따라서 수분흡수 속도상수가 0.0765 (6:4) > 0.0615 (7:3) > 0.0556 (8:2) 순으로 높았지만 깔짚의 교체주기는 13일 (8:2) > 11일 (7:3) > 10일 (6:4) 순으로 높았다 (Fig. 4-91). 교체 주기와 수분흡수속도는 상반된 결과를 나타냈는데, 깔짚의 사용 기간이 깔짚의 수분이 포화되는 시점에 의해서 결정되는 것이 아니고 수분을 일정한 수준의 속도로 흡수할 수 있는 기간에 의해서 결정되는 것으로 판단된다. 따라서 기사에서도 수분흡수속도 및 깔짚의 교체주기 측면에서 최적 깔짚 혼합 비율은 우사와 동일하게 피스모스:바이오차 = 8:2로 평가되었다.

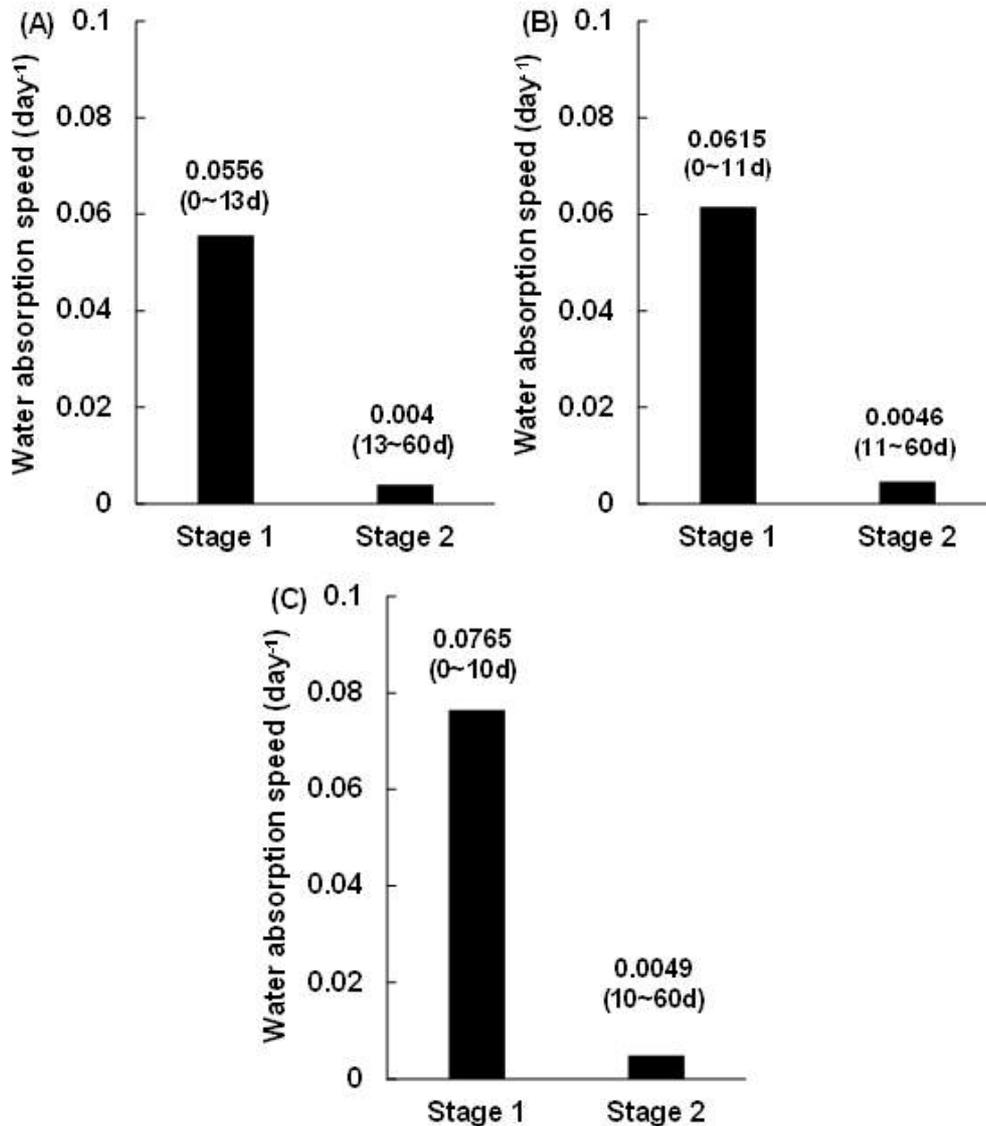


Fig. 4-91. 계분을 사용한 피트모스와 바이오차의 혼합비율에 따른 수분흡수속도 및 깔짚 교체 주기 [피트모스: 바이오차. A; 8:2, B; 7:3, C; 6:4].

(다) 우사 및 계사 깔짚 이용기술 개발 (사용량, 교체 시기 등)

① 우사의 깔짚 이용기술 개발

본 연구에서는 사용량과 교체 시기 측면에서 우사의 최적 깔짚 비율을 선정하고자 하였다. 깔짚의 사용량에 따른 수분흡수속도와 교체 시기에 대한 결과는 Fig. 4-92와 같다. 깔짚의 양은 두께를 기준으로 차이를 두었으며, 실험결과 깔짚의 두께가 2.5 cm에서 10 cm로 두꺼워질수록 초기의 수분흡수율은 매우 높아 수분흡수속도 상수는 0.0315 (2.5 cm) < 0.0576 (5 cm) < 0.0689 (7.5 cm) < 0.072 (10 cm) 순으로 높아졌다. 하지만 깔짚의 교체주기는 깔짚의 두께가 2.5 cm일 때 15일로 다른 처리구에 비해서 매우 낮았고, 깔짚의 두께가 5 cm 이상부터는 깔짚의 두께가 증가함에 따라서 깔짚의 교체 주기가 26일, 27일 및 29일로 깔짚의 두께에 따라서 깔짚의 교체 주기에는 큰 차이가 없었다. 따라서 경제성을 고려하였을 때 깔짚의 최적 사용량은 5 cm이었으며 이때의 교체 시기는 26일이었다.

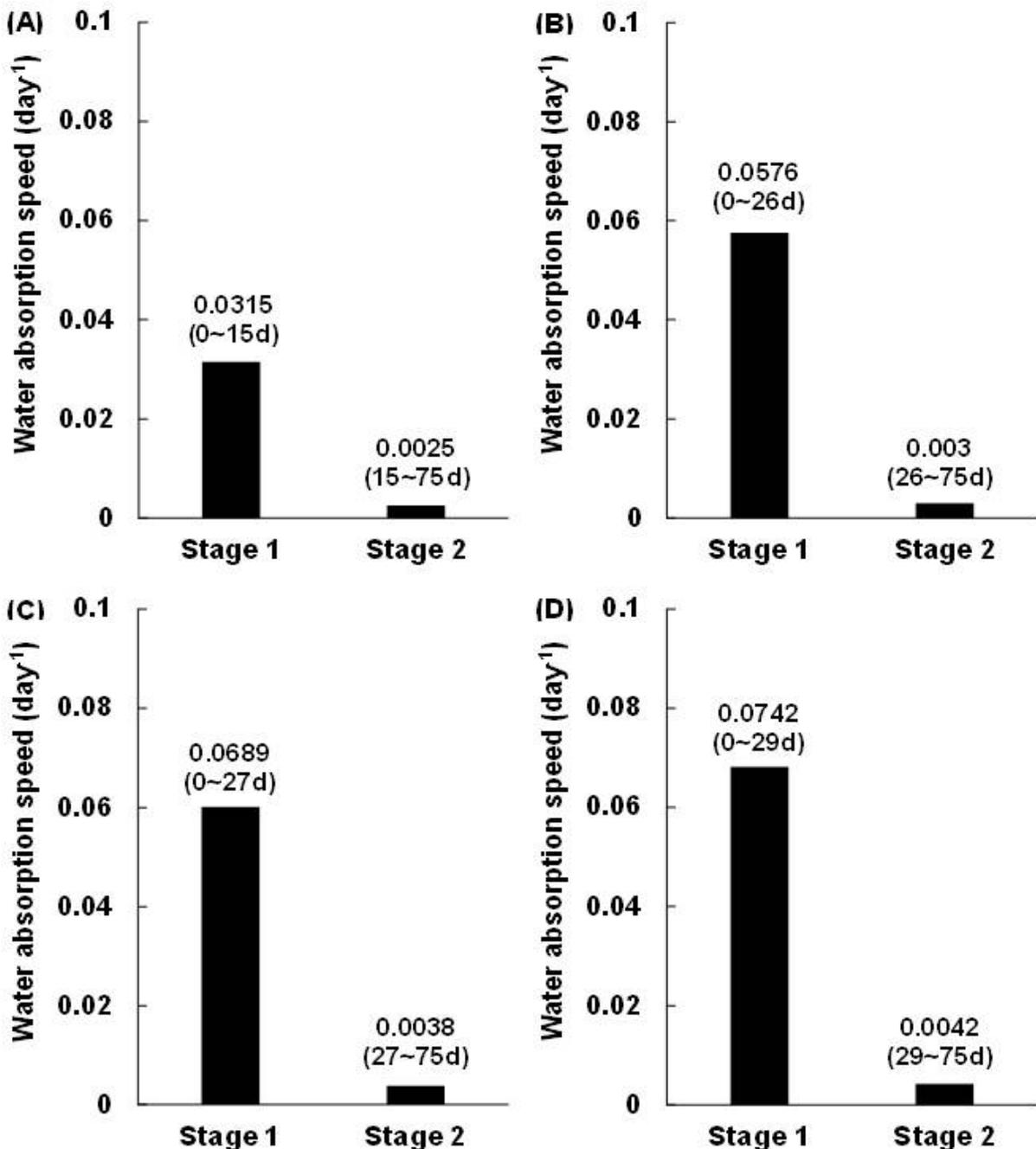


Fig. 4-92. 우분을 사용한 깔짚 사용량에 따른 수분흡수속도 및 깔짚 교체주기 [A : 2.5 cm, B : 5 cm, C : 7.5 cm, D : 10 cm].

② 계사의 깔짚 이용기술 개발

본 연구에서는 사용량과 교체 시기 측면에서 계사의 최적 깔짚 비율을 선정하고자 하였다. 계분을 사용한 깔짚의 사용량에 따른 수분 흡수속도와 교체 시기에 대한 결과는 Fig. 4-93과 같다. 깔짚의 양은 우분을 사용한 실험과 동일하게 두께를 기준으로 차이를 두었다. 실험 결과 우분을 사용한 실험 결과와 유사하게, 깔짚의 두께가 두꺼워질수록 초기 흡수율이 매우 빨라서 수분흡수속도 상수가 깔짚의 두께가 두꺼워질수록 증가하는 경향이였다. 깔짚의 두께에 따른 수분흡수속도 상수는 0.0472 (2.5 cm) < 0.0541 (5 cm) < 0.0572 (7.5 cm) < 0.0626 (10 cm) 순으로 높아졌다. 깔짚의 교체주기 역시 깔짚의 두께가 증가할수록 길어졌지만, 깔짚의 두께가 5 cm부터는 깔짚의 두께가 두꺼워질수록 깔짚의 교체주기가 크게 증가하지는 않았다. 깔짚의 두께가 5 cm일 때와 10 cm일 때 깔짚의 교체 주기는 2일 정도 차이가 나는 수준이었다. 계사에서의 깔짚의 최적 사용량은 5 cm이었으며 이때의 교체 시기는 13일이였다.

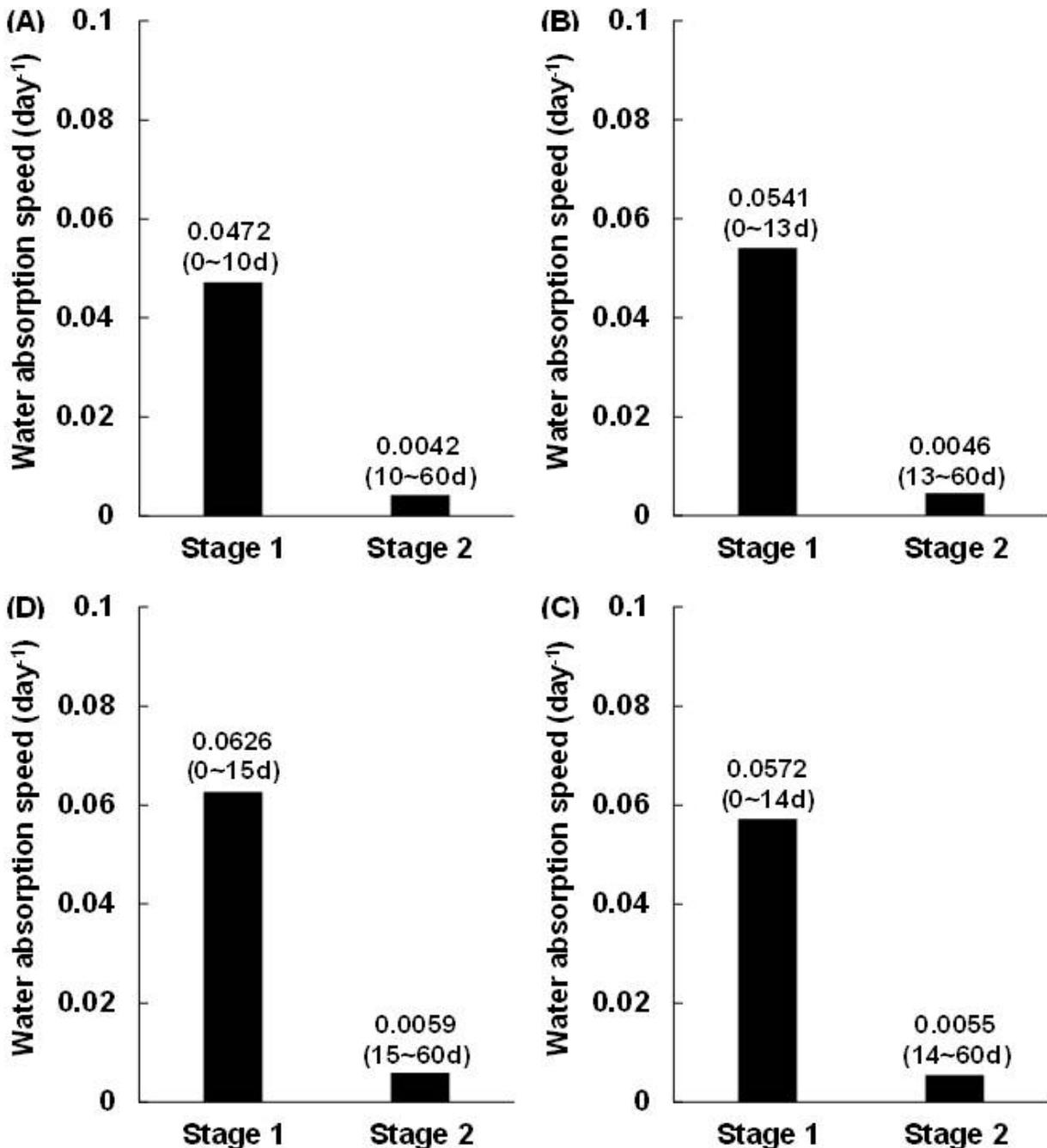


Fig. 4-93. 계분을 사용한 깔짚 사용량에 따른 수분흡수속도 및 깔짚 교체주기 [A : 2.5 cm, B : 5 cm, C : 7.5 cm, D : 10 cm].

(라) 우사 및 계사 깔짚 이용기술을 고려한 제조공정 최적화 및 표준화 공정 개발

1차년도의 실험을 통해서 미생물을 제조하기 위한 최적 미생물 혼합비율, 배양을 위한 대량 배양 최적 조건 및 제조된 미생물제의 최적 건조 조건을 도출해낼 수 있었다. 미생물을 제조하기 위한 최적 미생물 혼합비율은 *Bacillus subtilis* : *Saccharomyces cerevisiae* : *Lactobacillus sakei* = 2:1:1이었다. 미생물의 대량 배양을 위한 최적배지조건은 Sucrose 10 g/L, Yeast extract 5 g/L, NaHPO₄ 6 g/L, KH₂PO₄ 3 g/L, NaCl 0.5 g/L, MgSO₄ 0.24 g/L, CaCl₂ 0.01 g/L이었고, 교반속도, 배양온도 및 배양시간은 160 rpm, 30℃ 및 48 h 이었다. 또한 미생물을 발효하기 위한 고상발효 방법은 1차 발효와 2차 발효로 나뉘는데, 1차 발효를 위한 최적 조건은 미강과 밀기울을 1:1로 혼합하여서 35℃에서 24시간 동안 발효를 하는 것이고 2차 발효를 위한 최적 조건은 바이오차:코코피트:피트모스 = 1:1:3이었다. 하지만 본 연구에서 최적의 깔짚 비율은 피트모스:바이오차 = 8:2이었기 때문에 피트모스와 바이오차를 혼합한 재료로 2차 발효 효율을 평가하고자 하였고 실험한 결과, 바이오차:코코피트:피트모스 = 1:1:3 비율로 혼합한 것과 피트모스:바이오차 = 8:2 비율로 혼합한 깔짚의 미생물 생육은 초기 6시간까지는 1:1:3 비율에서 미생물의 생육이 더 활발하였지만, 최종 24시간까지 배양하였을 때는 1:1:3 과 8:2에서의 미생물 생육은 유사하였다. 따라서 본 연구에서 2차 발효를 위한 소재로써 피트모스:바이오차 = 8:2로 혼합한 소재를 최적의 소재로 선정하였다. 또한, 미생물의 발효를 위한 최적 주입 seed량은 1%이었고, 배양온도는 35℃, 배양시간은 각각 1차발효 24시간, 2차발효 24시간이었다. 고상 미생물제를 깔짚 소재로써 활용하기 위한 최적 수분함량은 약 30%, 미생물 생균수는 1x10⁶ CFU/mL로 설정하였는데, 최적 수분함량과 미생물의 생균수를 충족하는 건조온도 및 시간은 35℃, 24시간이었다. 제조된 미생물제의 최대 보관 기간을 미생물 활성 분석을 통해서 평가한 결과, 제조된 미생물은 4개월이 지난 후에는 미생물 생균수가 1x10⁶ CFU/mL 이하로 떨어져서 최대 4개월까지 보관이 가능했으며, 제조한 지 4개월이 지난 미생물제는 미생물제의 활성이 떨어져 깔짚 소재로써 효능이 떨어질 것으로 판단되었다.

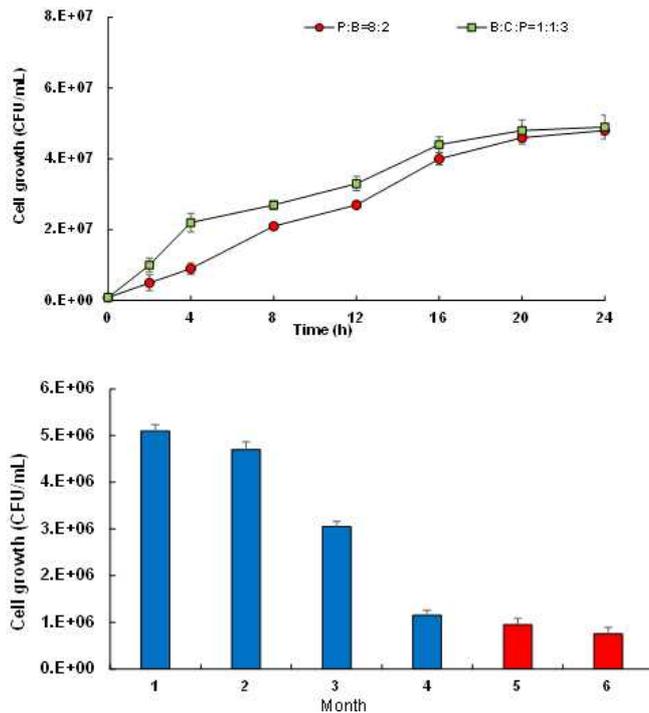


Fig. 4-94. 깔짚 혼합비율에 따른 미생물 생육 특성 및 미생물제 보관 기간에 따른 미생물 활성.

① 우사의 깔짚 제조공정 최적화 및 표준화 공정 개발



26일 경과

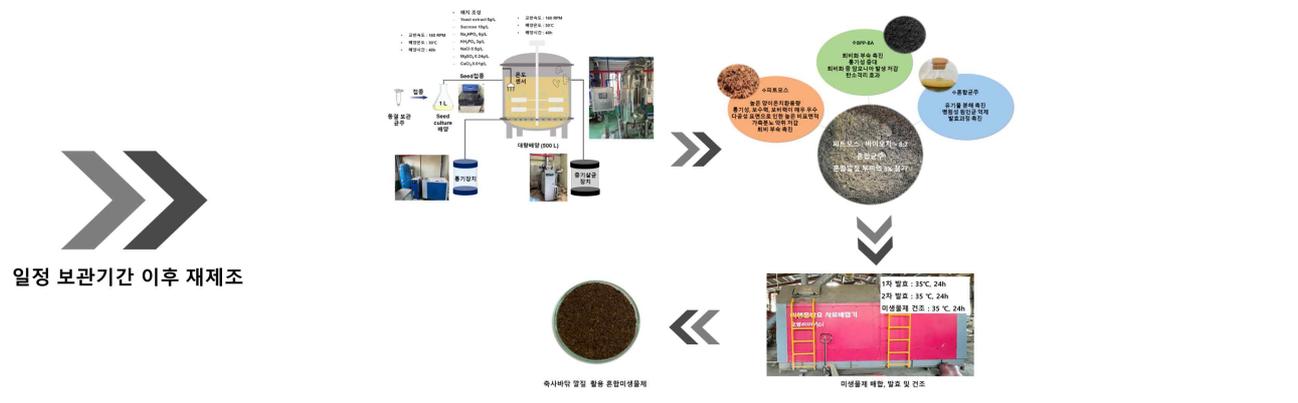


Fig. 4-95. 우사에 최적화된 깔짚 제조공정.

② 계사의 깔짚 제조공정 최적화 및 표준화 공정 개발



13일 경과

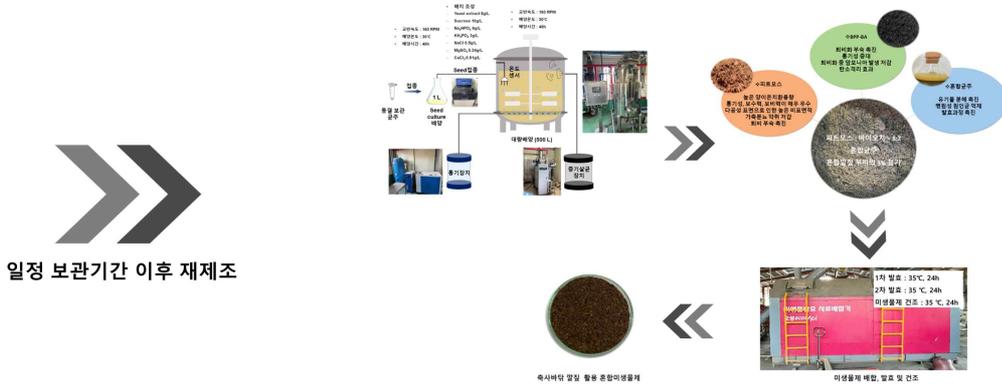


Fig. 4-96. 계사에 최적화된 깔짚 제조공정.

(2) 혼합미생물 첨가 우사 및 계사 깔짚 소재 시제품 개발

(가) 미생물 (쌀겨) + 왕겨 or 톱밥 발효깔개 개발

① 미생물 (쌀겨) + 왕겨 or 톱밥 발효깔개 시제품 생산

미생물이 혼입된 쌀겨를 왕겨 및 톱밥과 혼합하여 발효깔개 시제품을 제작하였다. 미생물이 혼합된 쌀겨는 탄소원으로써 미생물의 생육을 왕성하게 하여 미생물의 활성이 높아질 수 있게 할 수 있다. 따라서, 제조된 미생물제의 보관 기간을 연장할 수 있는 적절한 소재로써 사용될 수 있으며, 왕겨 및 톱밥은 이미 우사 및 계사의 깔짚 소재로써 많이 사용되고 있다. 미생물의 활성을 높일 수 있는 발효 깔짚을 제조하기 위해서 미생물이 혼입된 쌀겨와 왕겨 및 톱밥을 1:1 비율로 혼합하여 시제품을 생산하였다.



Fig. 4-97. 왕겨 및 톱밥 발효깔개의 시제품 제작.

② 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화

실증시험을 위한 발효 깔짚의 대량생산을 위해서 최적의 비율 (쌀겨:미생물 = 12:1)로 대량 배양한 혼합미생물을 쌀겨와 혼합한 후에, 쌀겨의 양과 동일한 비율로 왕겨와 혼합하였다. 배합기에서 미생물 혼입 쌀겨와 왕겨를 균질하게 혼합시켜 주었으며, 발효하기 위해서 35°C에서 24시간 동안 발효시켜주었다. 최적 건조온도인 35°C에서 24시간 동안 쌀겨, 왕겨 혼합 발효 깔짚을 건조하였다. 건조 후에 제품을 포장하여 최종 제품을 제조하였다.

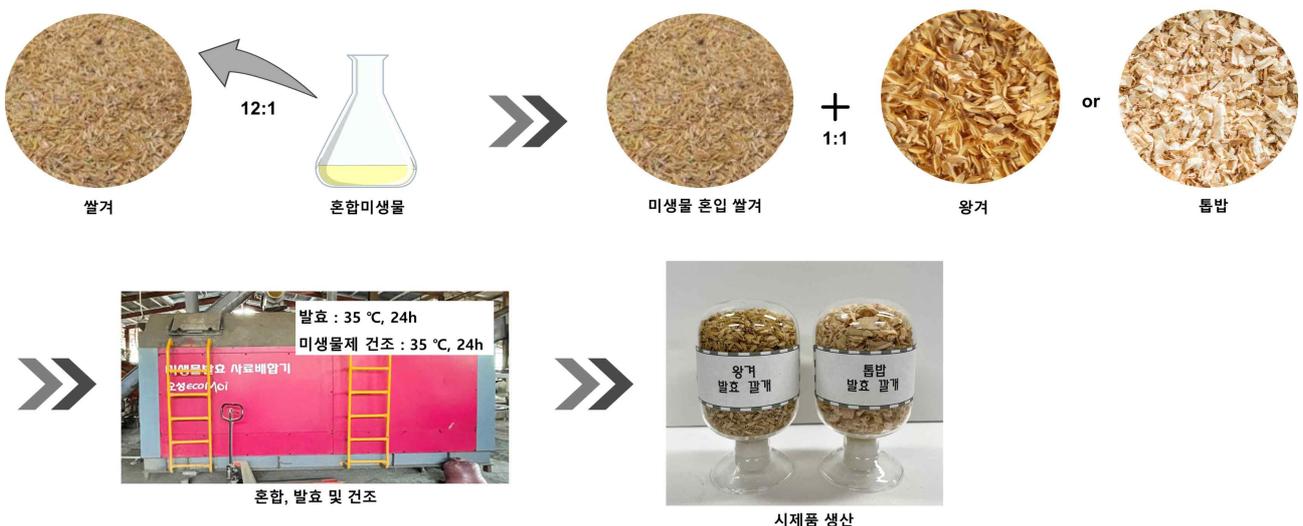


Fig. 4-98. 미생물(쌀겨) + 왕겨 발효깔개 제품 생산 공정.

(나) 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효 깔개 시제품 개발

① 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효 깔개 시제품 생산

미생물이 혼입된 쌀겨를 바이오차와 혼합하여 발효 깔개 시제품을 제조하였다. 바이오차는 본 과제와 관련한 실험을 통해서 깔짚으로써 활용한다면 수분흡수 효율이 높고, 초기의 발효에 큰 효과가 있으며, 퇴비의 부숙 시간을 단축할 수 있다고 밝혀졌다. 따라서 쌀겨와 바이오차를 혼합하여서 우사 및 계사의 깔짚 소재로서 활용해보고자 시제품을 생산하였다. 쌀겨에 미생물은 이전의 실험에서 미생물의 생육 및 활성에 가장 좋았던 쌀겨:미생물 = 12:1 비율로 혼합하였으며, 미생물 혼입 쌀겨와 바이오차는 1:1로 혼합하여 시제품을 제작하였다.



Fig. 4-99. 바이오차 발효 깔개의 시제품 제작.

② 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화

실증시험을 위한 미생물 혼입 쌀겨와 바이오차를 혼합하여 제조한 발효 깔짚을 대량생산 하기 위해서 쌀겨와 미생물을 12:1 비율로 혼합하였으며, 쌀겨와 동일한 비율로 바이오차를 혼합해 주었다. 미생물 혼입 쌀겨와 바이오차를 균질하게 혼합하기 위해서 대량 배합기에서 혼합하였으며, 35℃에서 24시간 동안 발효시켜주었다. 또한, 적정량의 수분 함량을 조절하기 위해서 35℃에서 24시간 동안 건조하였다. 건조된 미생물 혼입 쌀겨 및 바이오차 혼합 발효 깔개는 포장하여 최종 제품으로 생산되었다.

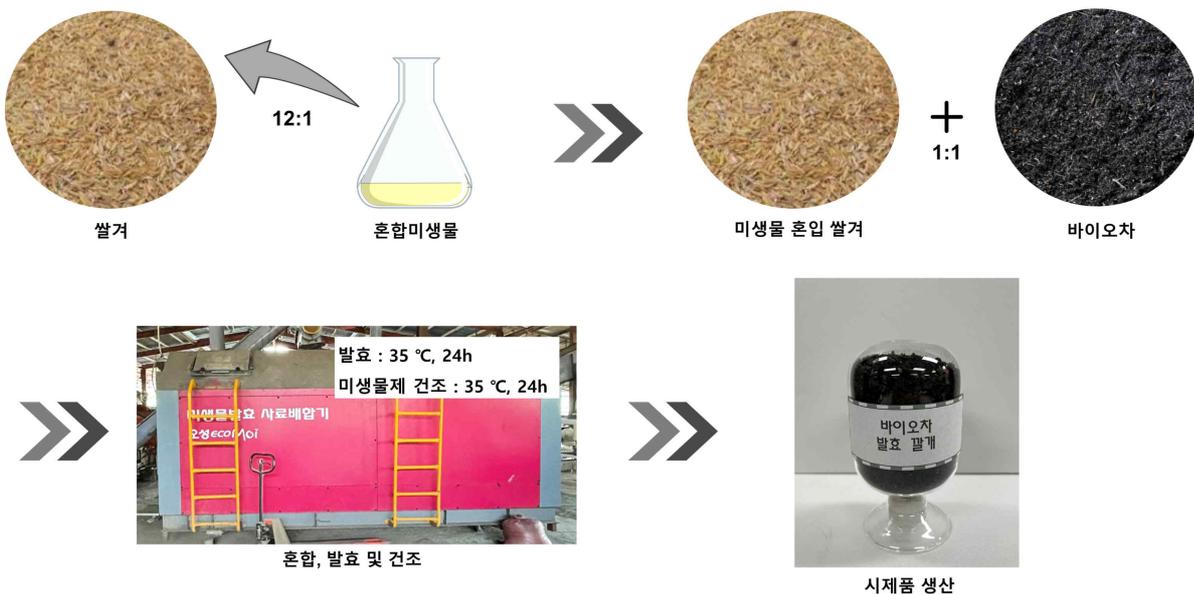


Fig. 4-100. 미생물(쌀겨) + 바이오차 발효 깔개 제품 생산 공정.

(다) 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효 깔개 시제품 개발

① 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효 깔개 시제품 생산

쌀겨에 미생물을 혼입하여 제조한 미생물 혼입 쌀겨와 바이오차와 피트모스를 함께 배합하여 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효 깔개 시제품을 제조하였다. 본 연구에서 최적의 깔짚으로 피트모스:바이오차 = 8:2로 선정되었기 때문에 쌀겨는 미량 혼입하여 쌀겨:피트모스:바이오차 = 1:8:2 비율로 혼입하여 제조하였으며, 쌀겨와 미생물의 혼합비율은 이전의 시제품의 제조방법과 동일하게 12:1로 해주었다.



Fig. 4-101. 바이오차 + 피트 발효 깔개의 시제품 제작.

② 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화

실증시험을 위해서 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효 깔개를 대량배양하기 위한 공정을 확립하였다. 쌀겨와 혼합미생물을 12:1 비율로 혼입하고 미생물 혼입 쌀겨:피트모스:바이오차 = 1:8:2 비율로 혼입하였다. 대량으로 혼입할 수 있는 배합기에서 깔개를 균질화하기 위해서 혼입해주었으며, 35℃에서 24시간 동안 미생물의 발효가 일어날 수 있게 하였다. 그 후 깔짚으로 사용하기 위한 수분 조건을 충족시키기 위해서 35℃에서 24시간 동안 건조하였다. 건조된 발효 깔개는 최종 제품으로 생산되었다.

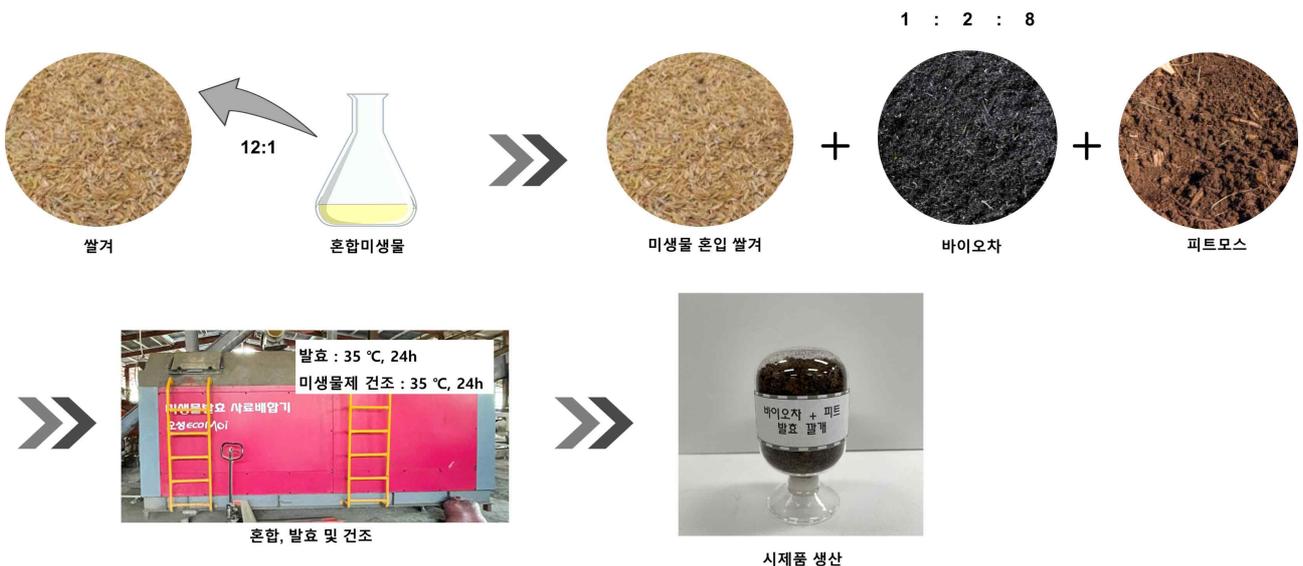


Fig. 4-102. 미생물(쌀겨) + 바이오차 + 피트 발효 깔개 제품 생산 공정.

(라) 미생물(쌀겨) + 피트 발효 깔개 시제품 개발

① 미생물(쌀겨) + 피트 발효 깔개 시제품 생산

피트모스에서는 미생물의 생육이 다른 소재에 비해 왕성하지 않은 것을 이전의 실험 결과에서 확인할 수 있었다. 하지만 쌀겨에 미생물을 투입하게 되면 미생물의 활성이 매우 높아졌다. 따라서 본 연구에서는 수분흡수능력이 매우 높지만 미생물의 생육을 활성화하지 못하는 소재인 피트모스에 미생물이 혼입된 쌀겨를 혼합하게 됨으로써 수분흡수 능력과 미생물 생존율을 높이하고자 하였다. 미생물 혼입 쌀겨와 피트모스는 1:1 비율로 혼합하여서 시제품을 제조하였다.



Fig. 4-103. 피트 발효 깔개의 시제품 제작.

② 실증시험을 위한 제품 생산 및 공정 최적화

미생물을 혼입한 쌀겨와 피트모스를 실증시험을 위한 제품으로 대량생산 하기 위해서 쌀겨와 미생물을 12:1로 혼합한 미생물 혼입 쌀겨와 피트모스를 1:1 비율로 혼합하였다. 다음으로 미생물을 발효 및 깔개 소재들끼리의 균질화를 위해서 대량 배합기 및 발효기에서 35℃, 24시간 동안 발효 및 혼합시켜 주었다. 발효가 완료된 발효깔개는 수분함량을 맞추기 위해서 건조기에서 35℃ 조건으로 24시간 동안 건조하였다. 건조가 완료된 피트모스 혼합 발효깔개는 최종 포장하여 제품으로 생산하였다.

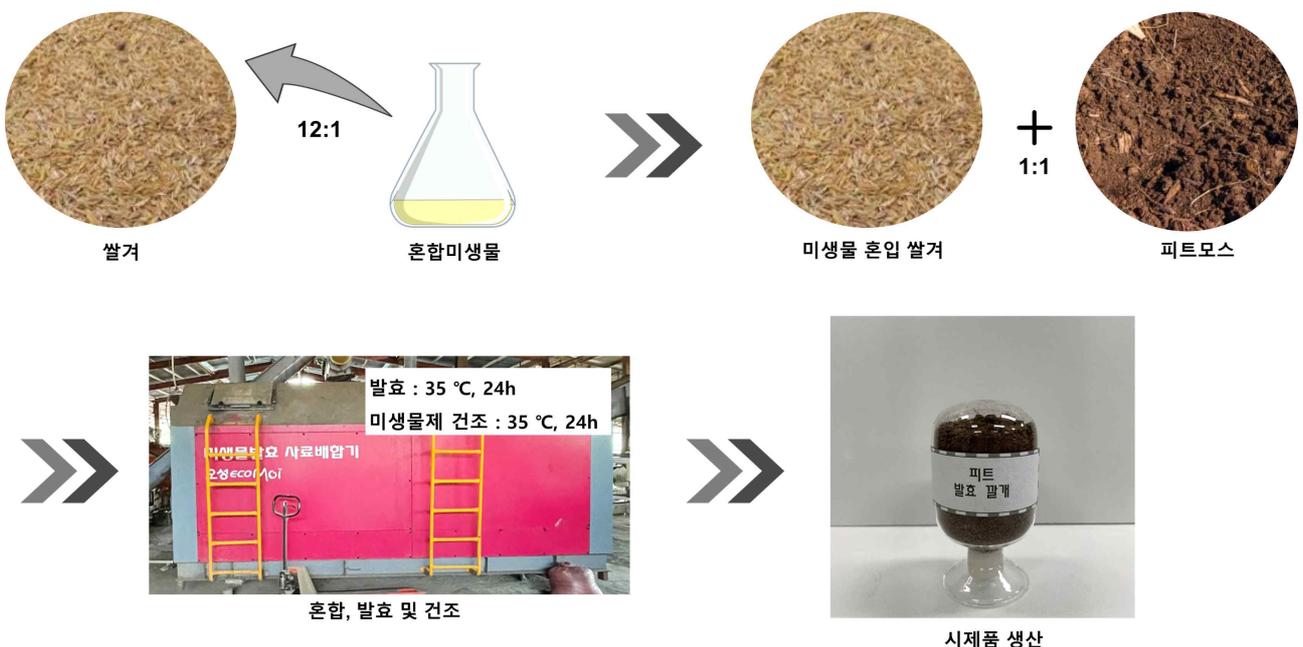


Fig. 4-104. 미생물(쌀겨) + 피트 발효 깔개 제품 생산 공정.

(3) 3톤 용량의 축사바닥 깔짚 소재 생산시스템 운영

(가) 우사 및 계사 맞춤형 발효깔짚 생산시스템 확립 및 제품생산

① 품질관리방법 확립

바이오차 혼합깔짚 제조를 위한 원료로는 피트모스와 바이오차를 활용하며, 피트모스는 수입산 피트모스를 사용하며, 바이오차는 남동발전 영동화력발전소에서 생산되는 바이오차를 원료로 한다. 피트모스 및 바이오차의 건조 방법은 실내 및 실외에서의 풍건으로 하며 제품 생산 이후 그늘진 장소에 보관하도록 한다. 제조된 깔짚의 품질 검사는 현재 깔짚에 대한 규격이 확립되어 있지 않기 때문에 농촌진흥청 고시 비료공정규격설정 내 가축분퇴비의 규격에 적합한지 확인이 필요하다. 품질 검사 항목으로는 As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn, 대장균, 살모넬라, 염분, 수분, 염산불용해물 등이 있다.

② 경제성 분석

개발된 바이오차 혼합깔짚의 가격은 원료비, 작업비, 포장비 및 운임비를 모두 포함하여 책정하였고 혼합 깔짚의 경제성 분석은 실제 축사에 사용하였을 때 적용되는 양을 고려하여 실시하였으며, 왕겨 및 대패밥과 비교 분석하였다. 현재 사용된 깔짚 원료가격과 물류비 등은 제품별, 지역별로 상당한 편차를 보이고 있어 경제성 분석시 다소 차이가 있을 수 있다. 하지만 개발된 깔짚의 좀 더 나은 경쟁력을 확보하기 위해 왕겨와 대패밥은 유통되고 있는 최저가격을 기준으로 경제성을 비교하였다.

바이오차 혼합깔짚의 가격은 비용편익을 고려하여 톤백 1개 당 140,000원 정도로 예상되었다. 깔짚별 축사에 적용했을 때 평당 단가를 비교하였을 경우, 국내 유통되는 깔짚의 비중이 가장 높은 대패밥에 비해 바이오차 혼합깔짚은 1.07배 정도 더 낮은 가격을 형성하여 대패밥과 경쟁이 가능할 것으로 판단하였다.

이를 깔짚 교체 주기를 고려하여 연간 사용 시 평당 비용으로 환산하였을 경우, 국내 깔짚의 비중이 가장 높은 대패밥의 연간 평당 비용은 360,000원으로 본 연구진이 개발한 바이오차 혼합깔짚의 비용은 1.5배 낮게 나타나 대패밥을 대체할 충분한 경쟁력을 확보한 것으로 판단하였다. 하지만 개발된 고기능성 바이오차 혼합깔짚은 아직까지 왕겨보다는 경쟁력이 다소 낮은 것으로 판단되며, 향후 경쟁력 확보를 위한 다음의 방안이 필요할 것으로 판단된다.

개발된 깔짚의 원가 경쟁력 개선을 위한 선결조건은 다음과 같다. 첫 번째 깔짚유통시 상당 부분을 차지하는 물류비용을 절감하기 위해 지역 거점센터를 운영하여 물류비용을 최소화할 필요가 있다. 두 번째로 폐자원을 활용율을 높여 원료 단가 경쟁력을 확보할 필요가 있다. 본 바이오차는 깔짚의 소재로 매우 우수한 성능을 보이고 있지만 현재 유통되고 있는 바이오차로는 경쟁력 확보가 쉽지 않은 상황이다. 따라서 본 연구진과 같이 폐자원의 재활용을 통한 경쟁력을 확보할 필요가 있다. 세 번째 피트모스 등 기타 소재의 수입처 다변화와 대량수입으로 원가 절감이 필요할 것으로 판단된다. 현재 국제상황 악화로 피트모스 등의 원자재 가격이 급등한 상황이다. 이러한 상황을 대처하기 위해 국내 보유물량확보 전략도 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로 바이오차 혼합깔짚의 효과와 기능성을 정량화하여 온실가스 감축효과를 인정받을 필요가 있다. 현재 토양개량제인 바이오차는 탄소중립실현을 위한 탄소격리효과를 인정받고 있지만 깔짚에 투입된 바이오차의 경우 퇴비화 이후 토양에 투입되어 탄소격리효과를 인정받아 경쟁력을 확보할 필요가 있다.

Table 4-62. 바이오차 혼합깔짚 가격(세부 내역, 톤백 1개 무게 350kg)

내역	비용(원/m ³)	비고
비용		
피트모스	80,000	운임포함(출고지→생산지)
바이오차	17,000	
작업비	20,000	깔짚 생산 작업 톤백
포장비	8,000	
편익	15,000	
합계	140,000	

Table 4-63. 깔짚별 단가 비교(평당 비용. 도포량 6cm 기준. 평당 200리터 부피의 깔짚이 소요)

구분	대패밥	왕겨	바이오차 혼합깔짚
단가(원/kg)	300	150	400
평당 도포량(kg)	100	40	70
평당 비용(원)	30,000	6,000	28,000
수당 비용(690수 기준)	500	100	467

Table 4-64. 깔짚별 연간 사용 시 평당 비용 비교

구분	대패밥	왕겨	바이오차 혼합깔짚
깔짚 교체 주기(일)	30	30	45
평당 비용(원)	30,000	6,000	28,000
연간 깔짚 교체 횟수(회)	12	12	8
연간 평당 비용(원)	360,000	72,000	224,000

다) 축사바닥 깔짚 소재의 우사 및 계사 실증포 운영

깔짚 소재로서 최적의 수분조절재를 선정하기 위하여 상기 연구에서 수분흡수율이 뛰어나고, 퇴비화 시 기능이 뚜렷한 톱밥, 왕겨, 코코피트 및 피트모스를 가축분뇨와 혼합한 후 다양한 온도에서 퇴비화를 실시하였다.

하지만, 수분조절재로서 투입한 원료 중 코코피트와 피트모스는 기존의 농업의 상토원료로서 가장 많이 사용되었으며, 최근 원-달러 환율 상승, 해상운임 등도 급등하였다. 또한 한국상토협회(<http://www.sangto.org/>)에 따르면 상토의 주요 원자재 '19년 (전년 10월~당해년 4월) 대비 2022년 같은 기간 동안 상승률이 코코피트 28.9~39.1%, 피트모스 7.1~20.3%에 달했다.

이와 같이 수분조절재로 선정한 원재료의 원가상승으로 인해, 수급이 불안정해 상토의 원료로 대부분이 공급되었기에, 연구과제의 일환인 실증포 운영을 위한 공급이 제한적이었다. 수분조절제의 수급량 부족으로 인해, 당초 계획한 각 지역별 실증포 운영에는 한계가 있었다.

육계농가 및 오리농가의 경우 22년 1/4분기(1~3월)와 3/4분기 (10~11월) 조류인플루엔자(AI) 유행^(*)으로 인해, 농가에서는 기존의 사용하던 소재를 변경하고, 외부 유입인자가 변경되는 등 방역관계로 인해 새로운 깔짚 소재를 실험적으로 실증포 운영을 하는 것에 대한 반감을 가지고 있었다. 하지만 수분조절 및 악취제거 등에 효과적인 결과가 있을 경우 오리 및 육계농가에서는 향후 실증포 운영에 적극적으로 사용할 것이라는 의견을 받았다.

^(*) AI 발생 횟수(출처:농림축산식품부가축발생현황)

- 22년 1월 : 10건 (전북 4건, 충청 4건, 경기 2건)
- 22년 2월 : 16건 (전북 3건, 충청 11건, 경남, 경기 각 1건)
- 22년 3월 : 1건 (전남)
- 22년 10월 : 3건(경북 2건, 충북 1건)
- 22년 11월 : 6건(충북 4건, 전북 2건)

(1) 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 우사 적용 실증포 운영

(가) 실증포 운영대상

① 강원도 횡성군 한우농가 (3개 농가)

강원도 횡성군 갑천면 외갑천로 (330 m ²)	
	
개발된 깔짚 소재 적용 전('22년 3월)	개발된 깔짚 소재 납품('22년 7월)

Fig. 4-105. 강원도 횡성군 갑천면 외갑천로 한우농가

강원도 횡성군 우천면 법주리 (330 m ²)	
	
개발된 깔짚 소재 적용 전('22년 3월)	개발된 깔짚 소재 납품('22년 7월)

Fig. 4-106. 강원도 횡성군 우천면 법주리 한우농가

② 경상남도 사천시 한우농가

농가 의견 : 투입 초기엔 수분조절재의 입자크기가 작은 이유로, 분진이 날리는 경향이 있으나, 약 12개월 이상 연령의 축사와 같이 활동이 왕성한 장소의 경우 약 3~4일 정도의 분뇨가 섞이면 분진이 많이 줄어들었다.



Fig. 4-107. 경남 사천시 사남면 송암길 한우농가

(2) 개발된 축사바닥 깔짚의 실제 계사 적용 실증포 운영

(가) 실증포 운영대상

① 경기도 안성시 오리농가



Fig. 4-108. 경기도 안성시 일죽면 월정리 오리농가

깔짚 소재 실증포 운영에 실시하려는 오리 농가는, 총 6개 동을 운영 중이며 이중 1개 동에 깔짚 소재 실증포를 운영할 것이며, 바로 옆에 위치한 곳을 대조군으로 비교 운영하여 향후 실험에 협조할 것이다.

각 동별로 평당 (3.3m²) 약 13.5마리를 사육하며, 이는 곧 1개 동 (200평, 660m²) 마다 약 2,700마리의 규모였다.

기존의 깔짚 소재로는 왕겨를 사용하고 있었으며 교체주기의 경우, 축산농가와 달리 연간 약

2회 (전체교체) 정도의 빈도로 이루어지고 있었다.

이곳 역시 조류인플레인자(AI) 감염 우려로 인해 주기적인 실험 계획 시, 실험자 및 실험도구의 방역 및 소독을 철저하게 해줄 것을 요구하였으며, 깔짚 소재 제작시 외부물질의 오염이 되지 않도록 당부를 하였다.

② 충북 음성군 오리농가



Fig. 4-109. 충북 음성군 삼성면 청용리 오리농가

깔짚 소재 실증포 운영에 실시하려는 오리농가는, 총 5개 동을 운영 중이며, 상기 1번의 농가와 마찬가지로 이 중 1개 동에 깔짚 소재 실증포를 운영할 것이며, 바로 옆에 위치한 곳을 대조군으로 비교 운영하여 향후 실험에 협조할 것이다.

또한, 사육규모, 교체시기 및 감염병 우려사항 역시, 경기 안성시의 농가와 유사하였다.

(3) 사용된 축사바닥 깔짚으로 제조된 퇴비의 농작물별 실증시범포 운영

축사바닥 깔짚으로 제조된 퇴비는 경상남도 진주시 및 경상남도 양산시에서 배추 및 콩에 대한 실증 시범포를 운영하였다.

라) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발

(1) 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개요

2년간의 연구를 통해 깔짚 소재 개발, 퇴비사 연계 공정 개발 및 환경 위해성 평가를 수행하였으며, 3차년도에 개발된 깔짚을 적용하여 생산된 퇴비를 이용한 작물재배 시험을 수행하여 깔짚 소재 개발을 완료할 계획이다. 축사바닥 깔짚소재와 퇴비사 연계 핵심기술 개발개요는 Fig. 4-110에서 보는 바와 같다.



Fig. 4-110. 축사바닥 깔짚소재와 퇴비사 연계 핵심기술 개발개요.

(2) 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 평가

(가) 왕겨 깔짚 사용 전과정 평가

계사에 왕겨 깔짚 적용 시 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 전과정의 수분함량 및 발아지수 변화는 Fig. 4-111에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 기간 중 수분함량은 계분뇨 투입 30일 후 포화되어 깔짚 사용 기간은 30일로 측정되었다. 퇴비화 기간 중 수분함량은 지속적으로 감소되는 경향을 보였으며, 발아지수는 지속적으로 증가하여 퇴비화 55일에 발아지수가 70에 도달하여 안정적인 퇴비가 생산되었다.

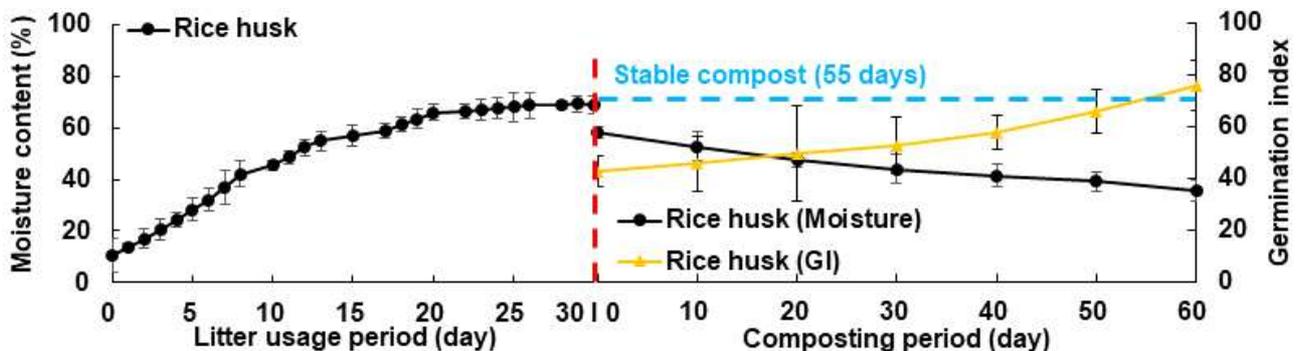


Fig. 4-111. 왕겨 깔짚 적용 시 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 전과정의 수분함량 및 발아지수.

깔짚 사용 기간 중 왕겨 깔짚 적용 시 계분뇨 대비 악취 저감 효율은 Fig. 4-112에 제시된 바와 같다. 왕겨 깔짚을 적용하였을 때 계분뇨 대비 악취 저감 효율이 27.1%로 확인되었다.

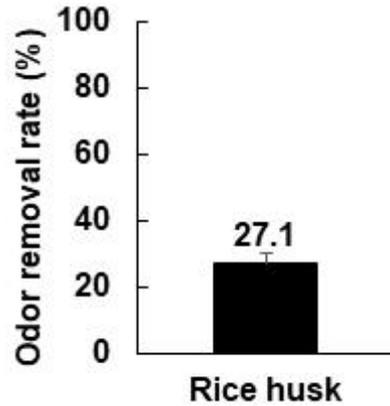


Fig. 4-112. 깔짚 사용 기간 중 왕겨 깔짚 적용 시 계분뇨 대비 악취 저감 효율.

(나) 혼합 깔짚 사용 전과정 평가

PM:BC(8:2) 적용 시 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 전과정의 수분함량 및 발아지수 변화는 Fig. 4-113에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 기간 중 수분함량은 계분뇨 투입 45일 후 포화되어 깔짚 사용 기간은 45일로 측정되어 왕겨의 깔짚 사용 기간 대비 15일이 증가하였다. 퇴비화 기간 중 수분 함량은 지속적으로 감소되는 경향을 보였으며, 발아지수는 지속적으로 증가하여 퇴비화 40일에 발아지수가 70에 도달하여 안정적인 퇴비가 생산되었으며, 왕겨 깔짚 대비 부숙 기간이 15일 단축되었다.

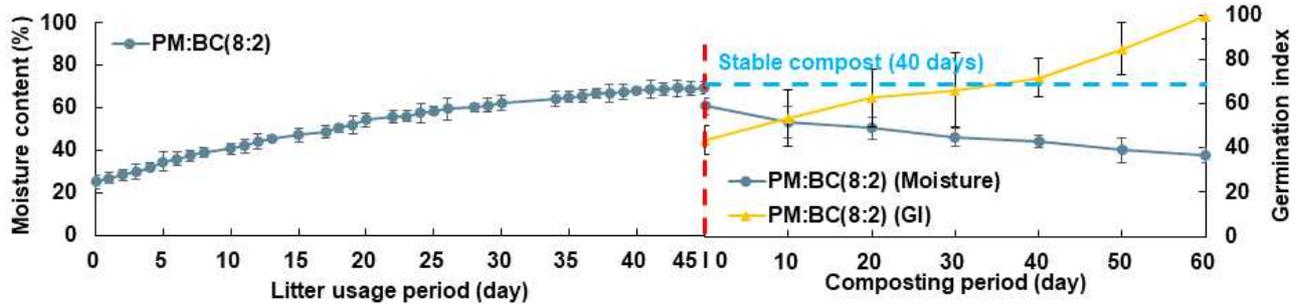


Fig. 4-113. PM:BC(8:2) 깔짚 적용 시 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 전과정의 수분함량 및 발아지수.

깔짚 사용 기간 중 PM:BC(8:2) 깔짚 적용 시 계분뇨 대비 악취 저감 효율은 Fig. 4-114에 제시된 바와 같다. PM:BC(8:2) 깔짚을 적용하였을 때 계분뇨 대비 악취 저감 효율이 81.7%로 확인되어 악취 저감율이 54.6% 상승되었다.

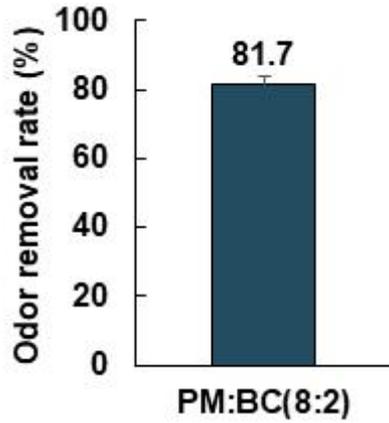


Fig. 4-114. PM:BC(8:2) 깔짚 적용 시 계분뇨 대비 악취 저감 효율.

PM:BC(2:8) 적용 시 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 전과정의 수분함량 및 발아지수 변화는 Fig. 4-115에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 기간 중 수분함량은 계분뇨 투입 42일 후 포화되어 깔짚 사용 기간은 42일로 측정되어 왕겨의 깔짚 사용 기간 대비 12일이 증가하였다. 퇴비화 기간 중 수분 함량은 지속적으로 감소되는 경향을 보였으며, 발아지수는 지속적으로 증가하여 퇴비화 50일에 발아지수가 70에 도달하여 안정적인 퇴비가 생산되었으며, 왕겨 깔짚 대비 부숙 기간이 5일 단축되었다.

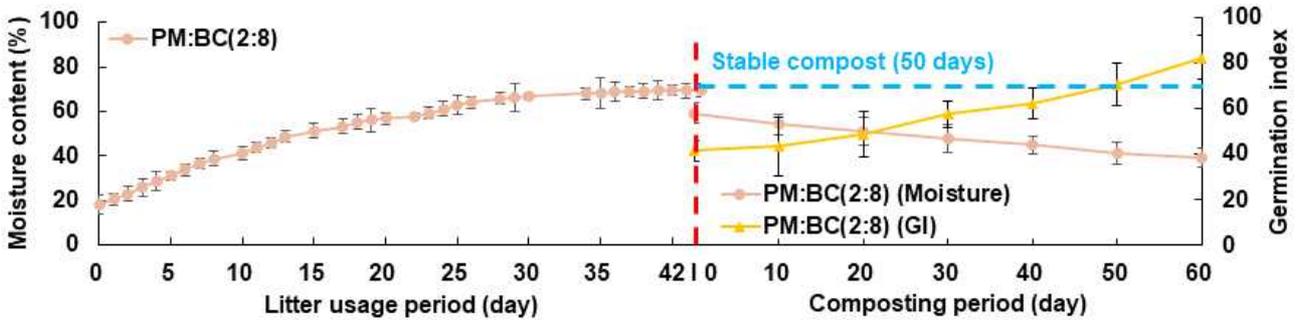


Fig. 4-115. PM:BC(2:8) 깔짚 적용 시 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 전과정의 수분함량 및 발아지수.

깔짚 사용 기간 중 PM:BC(2:8) 깔짚 적용 시 계분뇨 대비 악취 저감 효율은 Fig. 4-116에 제시된 바와 같다. PM:BC(2:8) 깔짚을 적용하였을 때 계분뇨 대비 악취 저감 효율이 72.4%로 확인되어 악취 저감율이 45.3% 상승되었다.

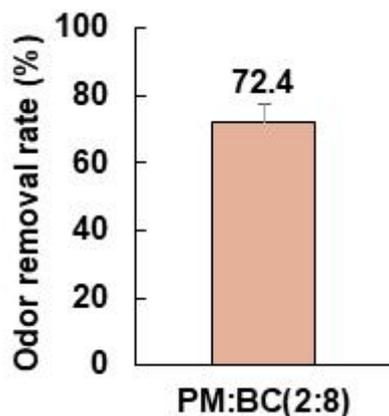


Fig. 4-116. PM:BC(2:8) 깔짚 적용 시 계분뇨 대비 악취 저감 효율.

(다) 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 평가 적요

상기 (가), (나) 항의 결과를 통해 PM:BC(8:2) 깔짚이 최적의 혼합 깔짚이었다. PM:BC(8:2) 깔짚을 사용하였을 때, 왕겨 대비 깔짚 사용 기간이 50% 증가되었으며, 악취 저감 효율이 54.6% 상승하였고, 퇴비 부숙 기간이 27% 단축되었다(Fig. 4-117).

상기 조건별 깔짚 시험 및 전과정 평가를 종합하여 평가하였을 때, 깔짚의 사용기간 연장, 악취 저감 효율 향상 및 퇴비 부숙 기간 단축 효과는 적용된 미생물에 의한 효과보다는 깔짚 원료 개발에 따른 효과가 더 큰 것으로 판단된다.

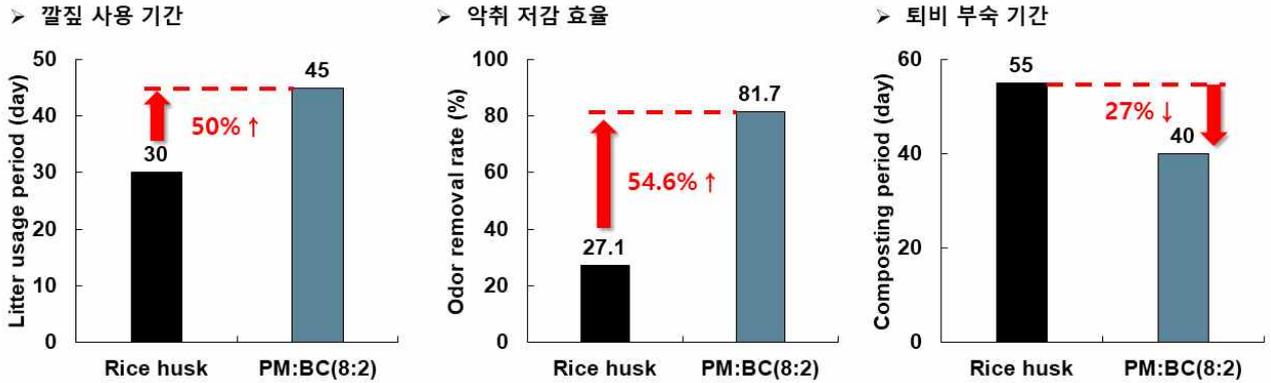


Fig. 4-117. 혼합 깔짚의 깔짚 사용 기간, 악취 저감 효율 및 퇴비 부숙 기간 향상 효과.



Fig. 4-118. 깔짚 사용 기간 및 퇴비화 기간 전과정 최종평가 결과.

왕겨 깔짚 사용 시 깔짚 사용 기간에 따른 Phylum 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-119에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Phylum 기준으로 비교하였을 때, *Bacteroidetes* 59.7%, *Proteobacteria* 16.5%, *Firmicutes* 8.4%, *Tenericutes* 5.5%, *Parcubacteria_OD1* 2.1%, *Actinobacteria* 1.9%, *Saccharibacteria_TM7* 1.8% 및 *Deinococcus-Thermus* 1.4%로 확인되었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Bacteroidetes* 60.4%, *Proteobacteria* 24.6% 및 *Firmicutes* 9.8%로 깔짚 사용 초기에 비해 각각 0.7%, 8.1% 및 1.4% 증가하였다. 깔짚 사용 완료 시점의 *Tenericutes*, *Actinobacteria* 및 *Saccharibacteria_TM7*의 분포는 각각 2.0%, 0.6% 및 0.5%로 깔짚 사용 초기에 비하여 각각 3.5%, 1.3% 및 1.3% 감소되었다.

왕겨 깔짚 사용 시 깔짚 사용 기간에 따른 Class 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-120에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Class 기준으로 비교하였을 때, *Bacteroidia* 25.9%, *Sphingobacteriia* 16.6%, *Flavobacteriia* 15.5% 및 *Gammaproteobacteria* 10.6%로 네 분류가 우점적으로 분포되어 있었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Bacteroidia*가 가장 우점적이었으며 51.4% 분포 되어 있어 깔짚 사용 초기에 비해 25.5% 증가되었다. *Sphingobacteriia*, *Flavobacteriia* 및 *Gammaproteobacteria*는 깔짚 사용 초기에 비해 분포 비율이 감소되었다.

왕겨 깔짚 사용 시 깔짚 사용 기간에 따른 Order 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-121에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Order 기준으로 비교하였을 때, *Bacteroidales* 18.0%, *Sphingobacteriales* 16.5% 및 *Flavobacteriales* 15.5%로 세 분류가 우점적으로 분포되었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Bacteroidales*가 43.4%로 깔짚 사용 초기에 비해 25.4% 증가되어 가장 우점적이었다. *Sphingobacteriales* 및 *Flavobacteriales*는 각각 4.4% 및 3.9%로 분포되어 깔짚 사용 초기에 비해 각각 12.1% 및 11.6% 감소되었다.

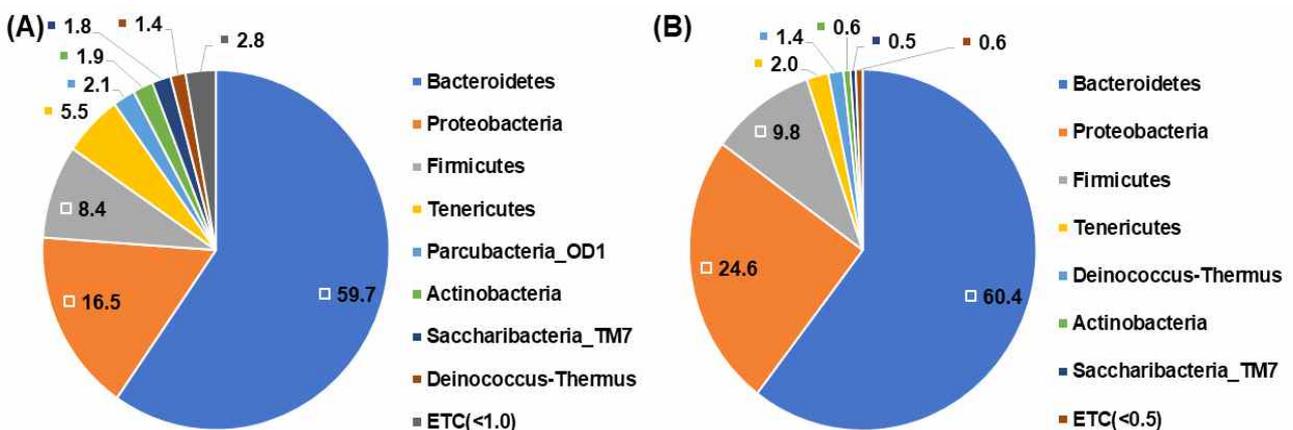


Fig. 4-119. 왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Phylum 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

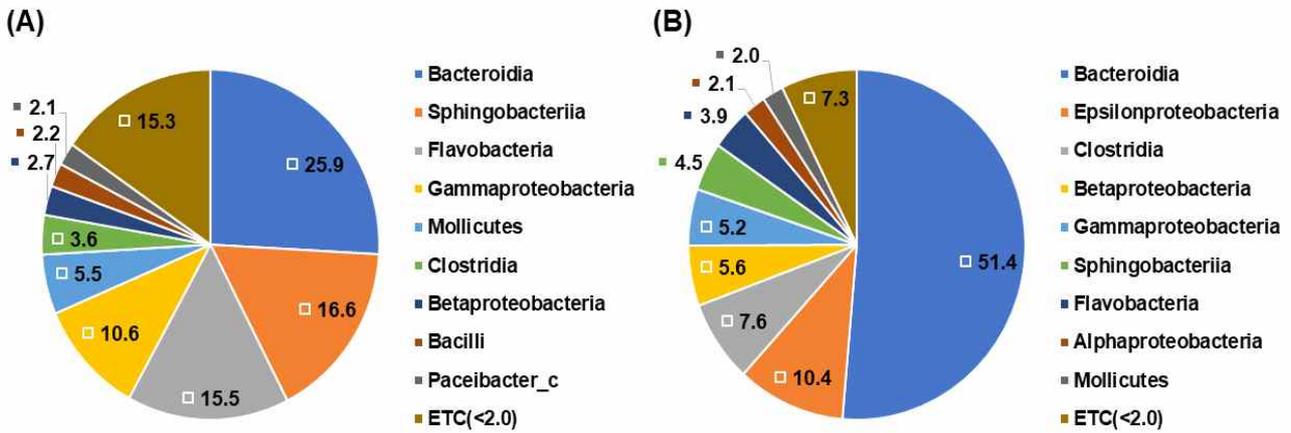


Fig. 4-120. 왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Class 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

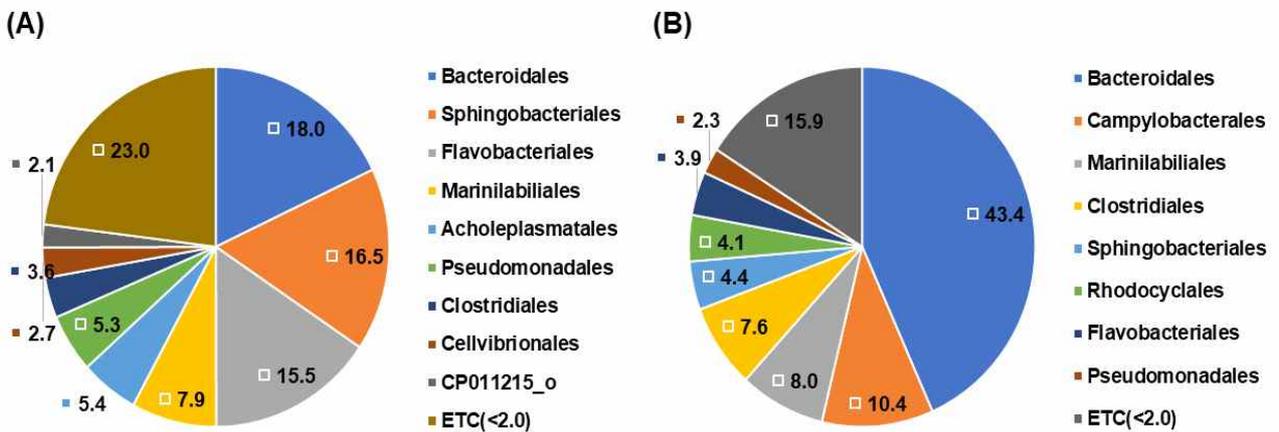


Fig. 4-121. 왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Order 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Family 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-122 에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Family 기준으로 비교하였을 때, 우점적으로 분포된 분류는 *Porphyromonadaceae* 17.9%, *Flavobacteriaceae* 13.2% 및 *Sphingobacteriaceae* 9.8%로 확인되었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Bacteroidaceae*가 27.5%로 우점적이었으며, 깔짚 사용 초기에 우점적이었던 *Porphyromonadaceae*, *Flavobacteriaceae* 및 *Sphingobacteriaceae*는 감소되었다.

왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Genus 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-123 에서 보는 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Genus 기준으로 비교하였을 때, *Proteiniphilium*은 11.0%, *Geofilum*은 7.9%, *Moheibacter*가 7.8%로 우점적으로 분포되었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Bacteroides* 및 *Arcobacter*가 우점적이었으며 각각 27.5% 및 10.4%로 분포되어 있었고, 깔짚 사용 초기에 우점적이었던 세 분류는 감소되는 경향을 보였다.

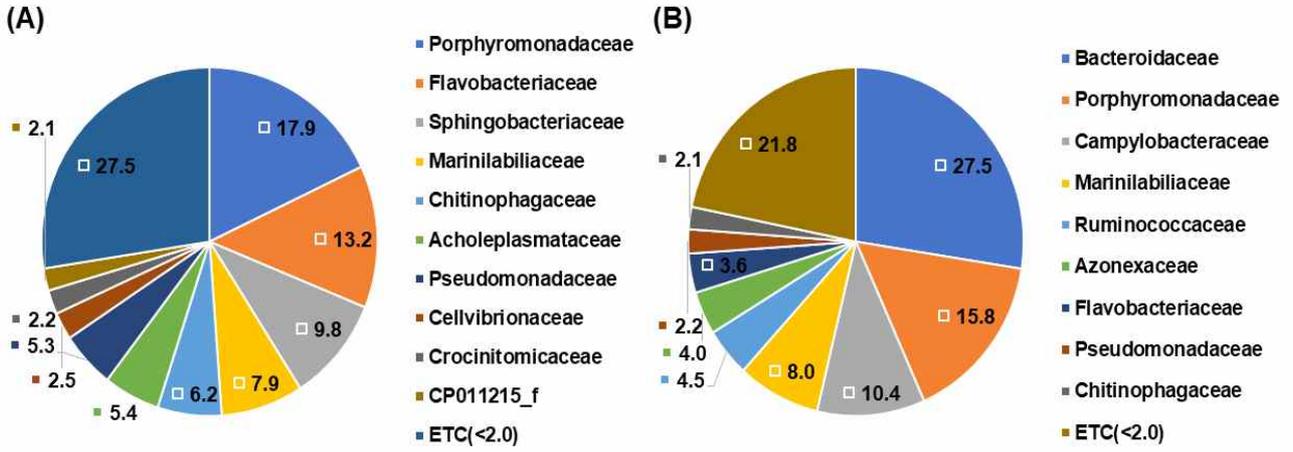


Fig. 4-122. 왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Family 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

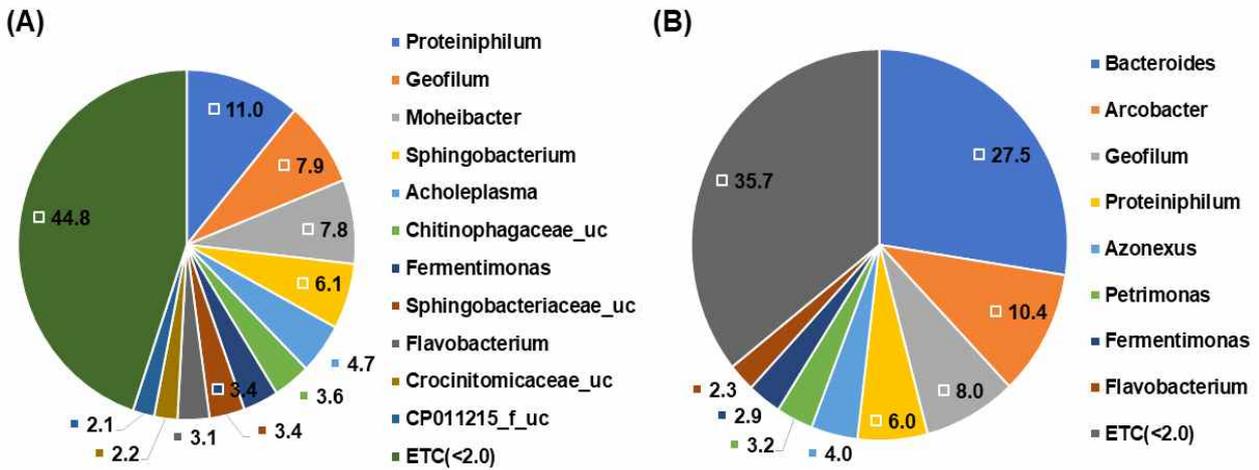


Fig. 4-123. 왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Genus 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Species 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-124에서 보는 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Species 기준으로 비교하였을 때, *Proteiniphilum EF559172_s* 및 *Geofilum rhodophaeum*이 각각 10.5% 및 7.9%로 우점적으로 분포되었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Bacteroides graminisolvens*가 27.5% 분포되어 가장 우점적이었다. *Proteiniphilum EF559172_s*는 깔짚 사용 초기에 비해 감소되었으며 *Geofilum rhodophaeum*는 깔짚 사용 초기와 유사하게 8.0% 분포되어 있었다.

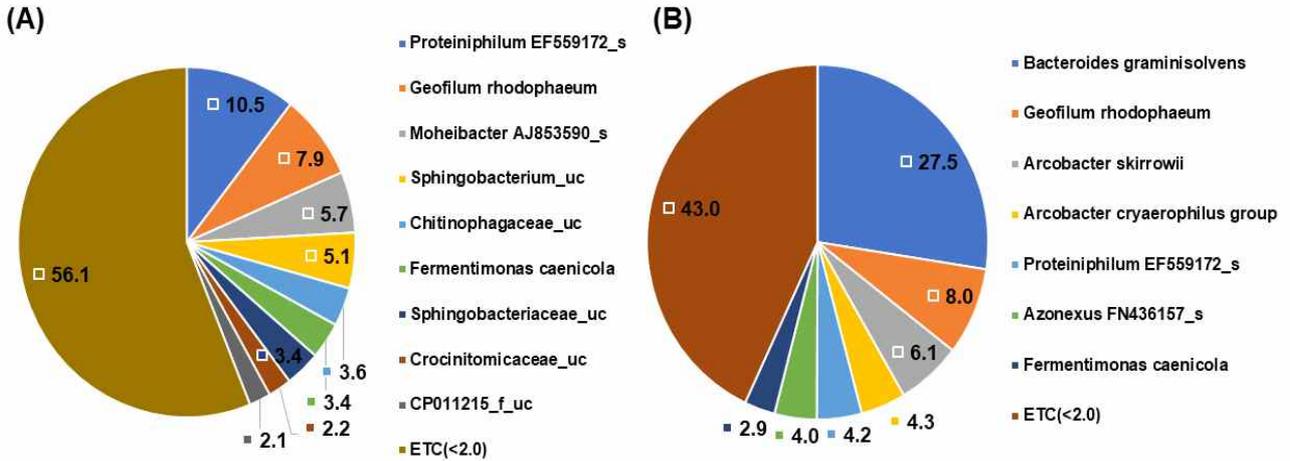


Fig. 4-124. 왕겨 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Species 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

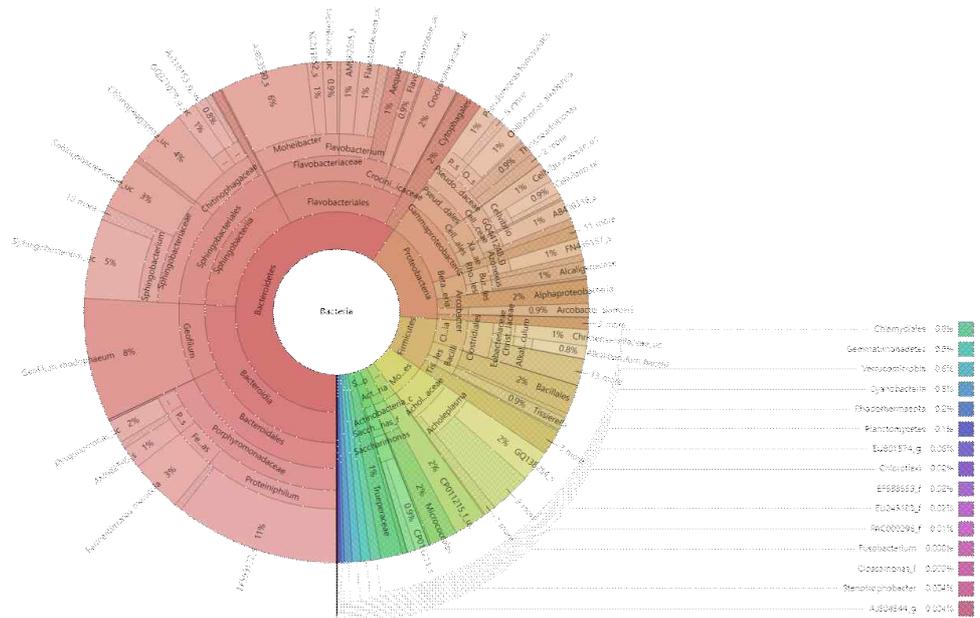


Fig. 4-125. 왕겨 깔짚 사용 초기의 미생물 군집 분포.

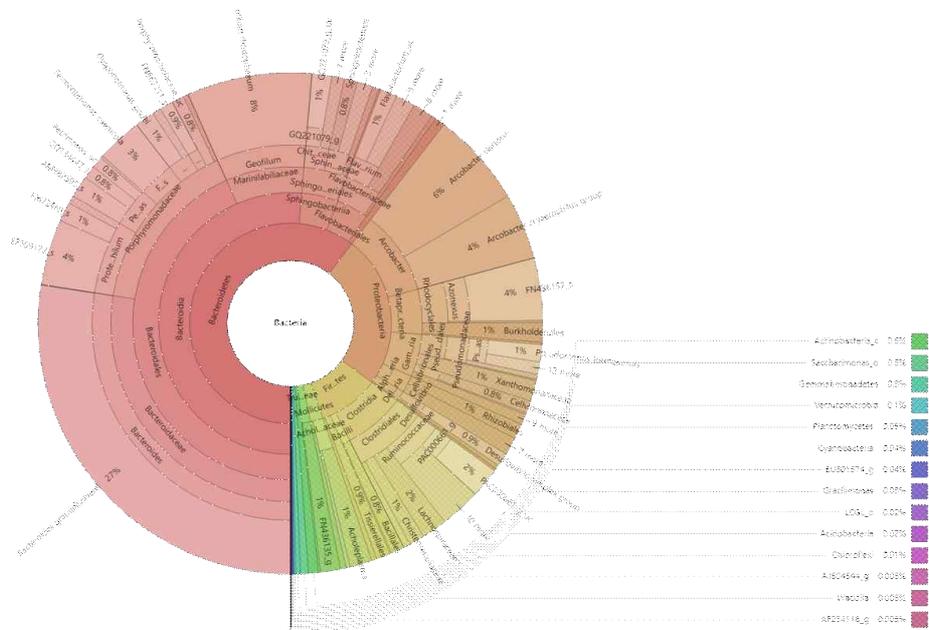


Fig. 4-126. 왕겨 깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포.

PM:BC(8:2) 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Phylum 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-127에서 보는 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Phylum 기준으로 비교하였을 때, *Bacteroidetes* 46.9%, *Proteobacteria* 29.0%, *Firmicutes* 5.0%, *Saccharibacteria_TM7* 3.9%, *Tenericutes* 3.6%, *Actinobacteria* 3.5%, *Rhodothermaeota* 2.7% 및 *Cyanobacteria* 2.0%로 확인되었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Bacteroidetes* 45.2%, *Firmicutes* 3.6% 및 *Actinobacteria* 1.7%로 깔짚 사용 초기에 비하여 각각 1.7%, 1.4% 및 1.8% 감소되었다. 깔짚 사용 완료 시점의 *Proteobacteria*, *Saccharibacteria_TM7*, *Tenericutes* 및 *Gemmatimonodetes*의 분포는 각각 33.0%, 8.8%, 3.8% 및 1.7%로 깔짚 사용 초기에 비하여 각각 4.0%, 4.9%, 0.2% 및 1.2% 증가되었다.

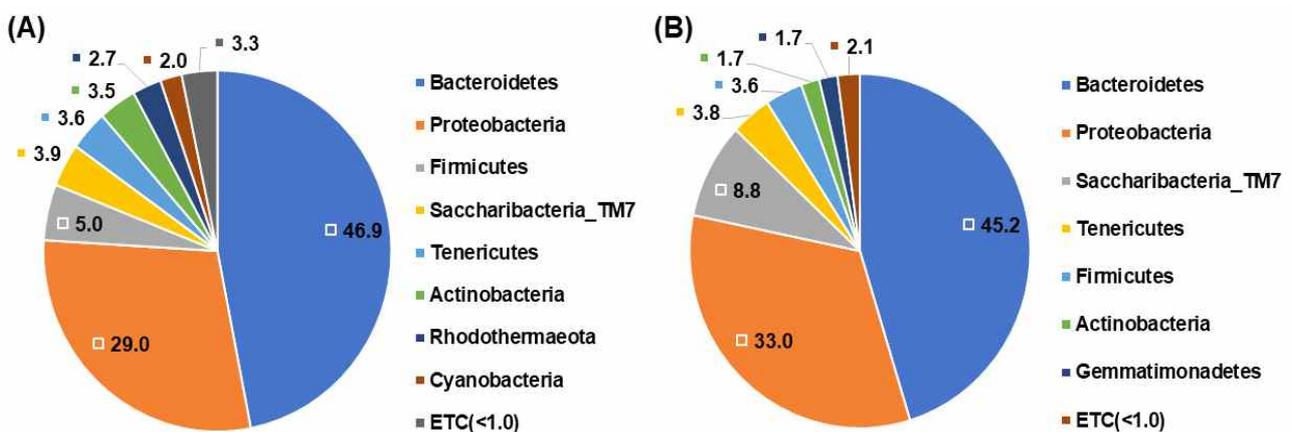


Fig. 4-127. PM:BC(8:2) 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Phylum 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

PM:BC(8:2) 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Class 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-128에 나타내었다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Class 기준으로 비교하였을 때, *Flavobacteria*, *Gammaproteobacteria* 및 *Sphingobacteriia*가 각각 26.2%, 21.4% 및 18.1% 분포되어 우점적으로 나타났다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Sphingobacteriia*의 분포가 5.5% 증가되어 20.7%로 가장 우점적이었다. *Gammaproteobacteria*의 분포는 1.4% 감소되었지만 우점적인 것으로 확인되었으며, *Bacteroidia*의 분포가 16.8%로 증가되었다.

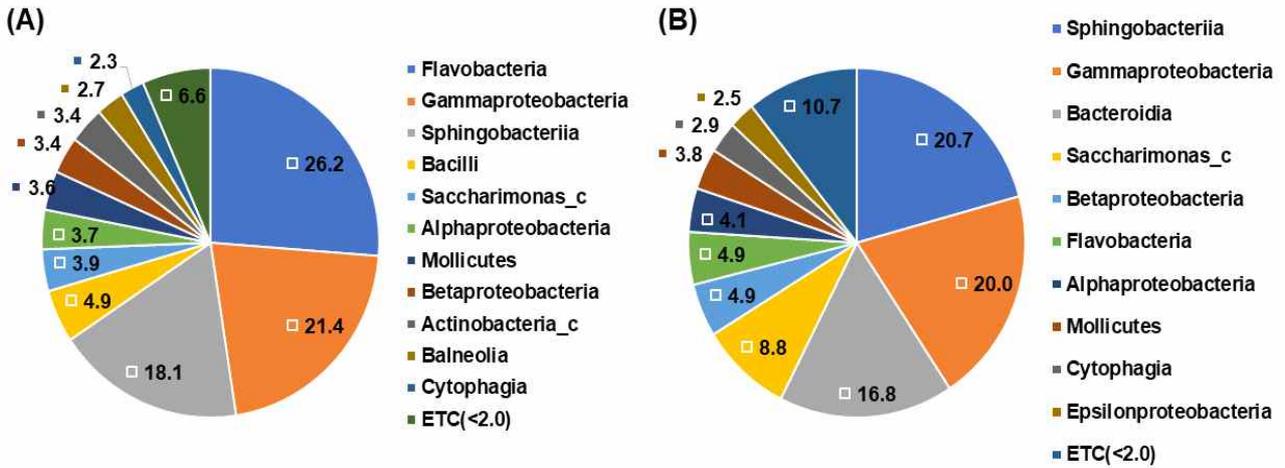


Fig. 4-128. PM:BC(8:2) 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Class 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

PM:BC(8:2) 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Order 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-129에 나타내었다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Order 기준으로 비교하였을 때, *Flavobacteriales*는 26.2%, *Sphingobacteriales*는 17.7% 및 *Xanthomonadales*가 9.4%로 우점적으로 분포되어 있었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Sphingobacteriales*가 20.6%로 증가되어 가장 우점적으로 나타났다. *Sphingobacteriales* 및 *Xanthomonadales*의 분포는 감소되었으며, *Bacteroidales*의 분포가 증가되어 *Sphingobacteriales*와 함께 우점적이었다.

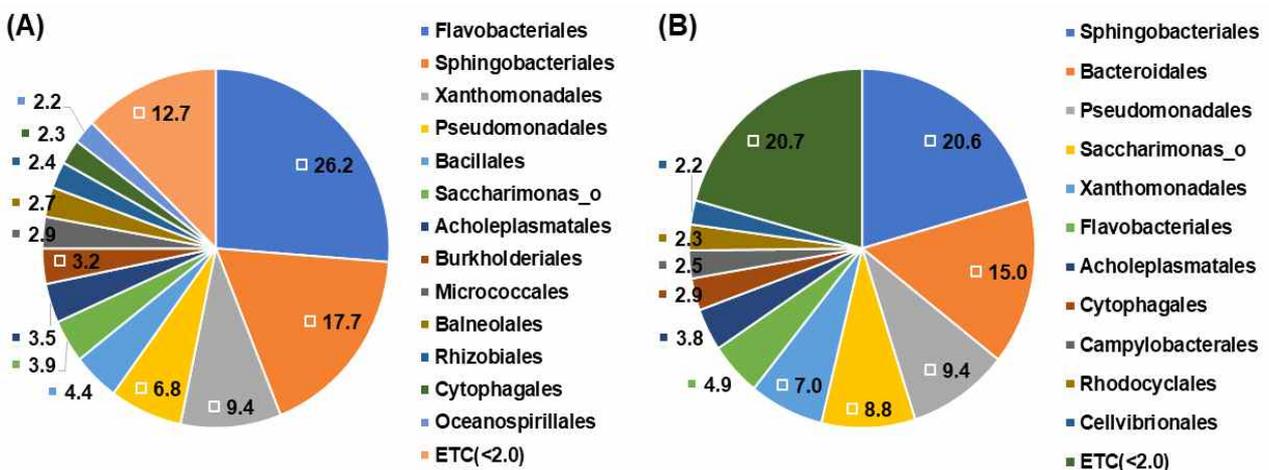


Fig. 4-129. PM:BC(8:2) 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Order 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

PM:BC(8:2) 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Family 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-130에 나타내었다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Family 기준으로 비교하였을 때, *Crocinitomicaceae*가 22.0%로 가장 우점적이었으며, *Xanthomonadaceae*가 9.4%로 두 번째로 높게 분포되어 있었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Crocinitomicaceae* 및 *Xanthomonadaceae*가 크게 감소되었으며, *Chitinophagaceae* 및 *Bacteroidaceae*가 각각 12.5% 및 12.0% 분포되어 우점적이었다.

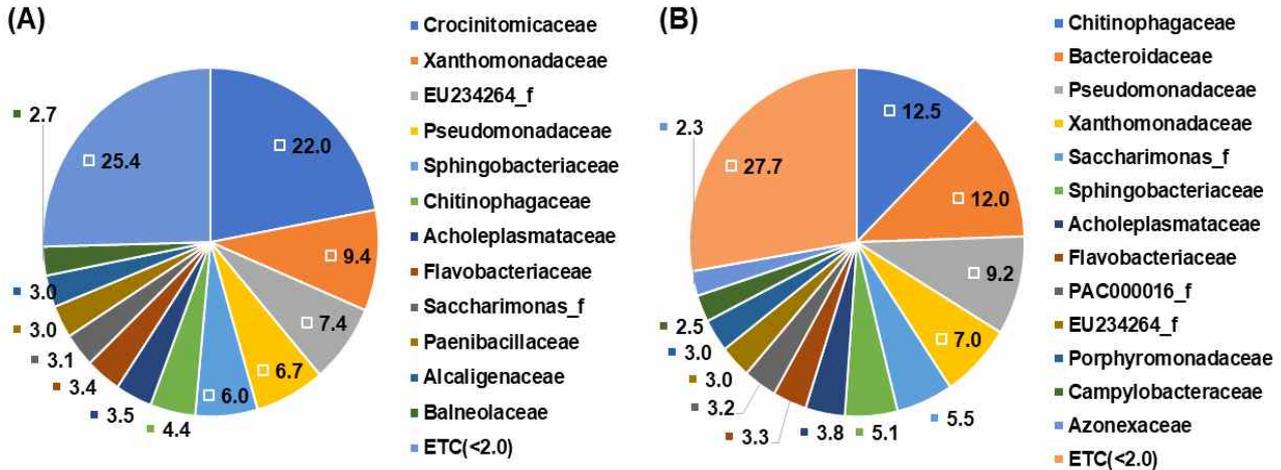


Fig. 4-130. PM:BC(8:2) 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Family 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

PM:BC(8:2) 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Genus 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-131에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Genus 기준으로 비교하였을 때, *Crocinitomicaceae_uc*가 22.0%로 가장 우점적으로 분포되어 있었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Crocinitomicaceae_uc*가 크게 감소되었으며, *Bacteroides* 및 *Pseudomonas*의 분포가 증가되어 각각 12.0% 및 9.0%로 우점적으로 분포되었다.

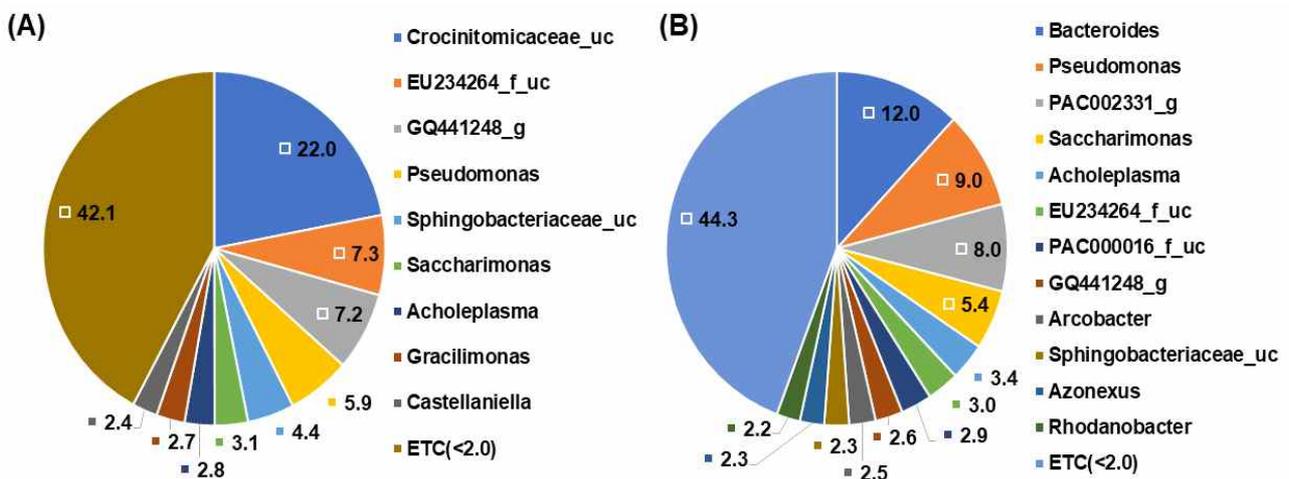


Fig. 4-131. PM:BC(8:2) 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Genus 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

PM:BC(8:2) 깔짚 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Species 기준의 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 4-132에 제시된 바와 같다. 깔짚 사용 초기 미생물 군집 분포는 Species 기준으로 비교하였을 때, *Crocinitomicaceae_uc*가 22.0%로 가장 우점적으로 분포되어 있었다.

깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포는 *Crocinitomicaceae_uc*가 크게 감소되었으며, *Bacteroides graminisolvens* 및 *PAC002331_g A M982670_S*의 분포가 증가되어 각각 12.0% 및 7.7%로 우점적으로 분포되었다.

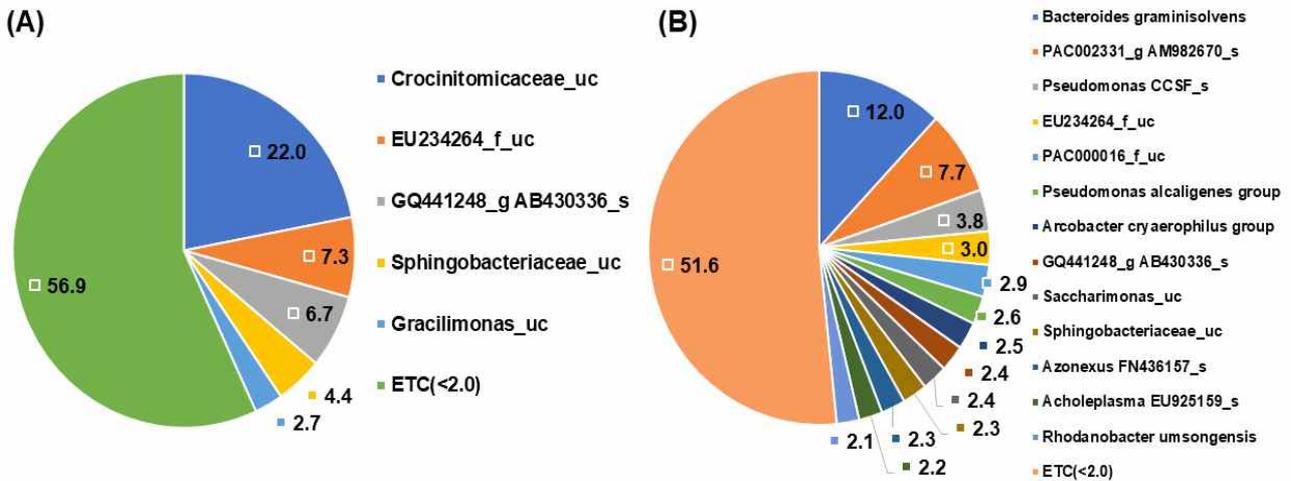


Fig. 4-132. PM:BC(8:2) 사용시 깔짚 사용 기간에 따른 Species 기준의 미생물 군집 분포 변화 [(A) 깔짚 사용 초기, (B) 깔짚 사용 완료 시점].

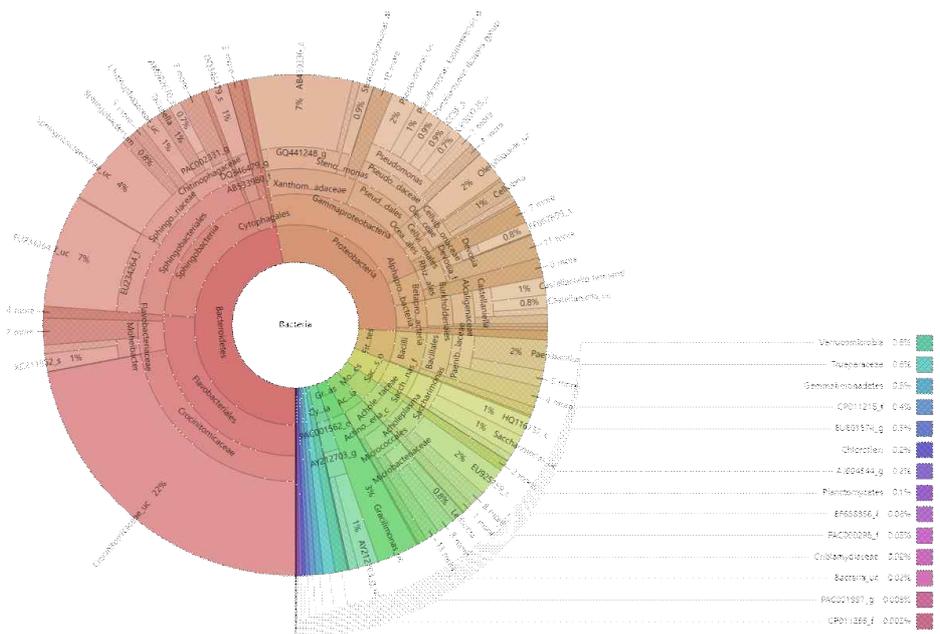


Fig. 4-133. PM:BC(8:2) 깔짚 사용 초기의 미생물 군집 분포.

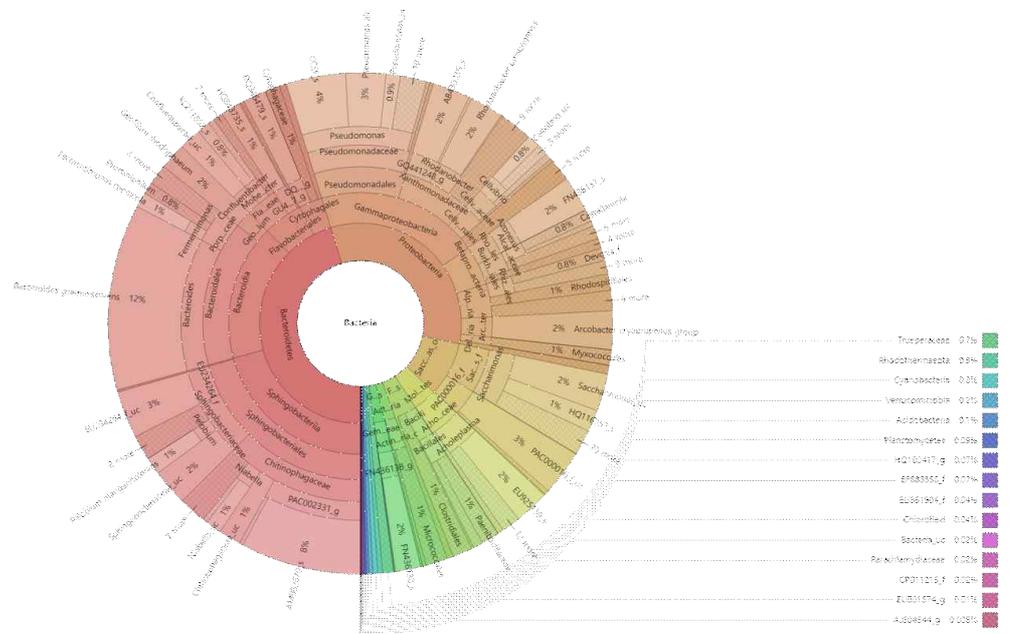


Fig. 4-134. PM:BC(8:2) 깔짚 사용 완료 시점의 미생물 군집 분포.

3) 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재의 실용화 및 산업화

가) 개발된 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 효과 검증

(1) 축사바닥 깔짚 소재 특성 및 안정성 시험

(가) 최적시스템에서 제조된 깔짚 소재의 특성

① 최적시스템에서 제조된 깔짚의 이화학적 특성

최적 시스템에서 제조된 깔짚의 이화학적 특성은 Table 5-1에서 나타난 바와 같다. 최적시스템에서 제조된 깔짚의 EC는 0.50 dS/m로 Table 3-1에서 나타난 피트모스의 EC 값인 1.17 dS/m 보다 낮고, Table 3-4에서 나타난 바이오차의 EC 값인 0.18 dS/m 보다는 높은 수치로 확인되었다. pH는 4.7로 약산성을 띠고 있으며, 유기물 함량은 90.6%로 높은 수치가 확인되었다. T-N은 0.04% 였으며, K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 각각 3.8, 2820, 1860 및 1298 mg/kg 이었다.

Table 5-1. 최적시스템에서 제조된 깔짚의 이화학적 특성

Treatment	EC (dS/m)	pH (1:10)	OM --- (%) ---	T-N ---	P ₂ O ₅ -----	K (mg/kg)	Ca -----	Mg -----	Na -----
바이오차 혼합깔짚	0.50	4.7	90.6	0.04	9.42	3.8	2820	1860	1298

(PM: Peat moss, BC: Biochar, OM: Organic matter)

최적시스템에서 제조된 깔짚의 물리적 특성은 수분함량, 수분흡수율, 용적밀도 및 유효입경을 조사하였으며, 그 결과는 Table 5-2에서 보는 것과 같다. 최적시스템에서 제조된 깔짚의 수분함량은 32.4%로 비교적 높은 수치가 확인되었다. 수분흡수율의 경우는 642%로 높은 수분흡수율을 보였고, 용적밀도는 0.13 g/cm³ 였으며, 유효입경은 0.08로 확인되었다.

Table 5-2. 최적시스템에서 제조된 깔짚의 물리적 특성

Treatment	WC ----- (%) -----	WAR -----	Bulk density (g/cm ³)	Effective grain size (mm)
바이오차 혼합깔짚	32.4	642	0.13	0.08

(WC; water contents, WAR; water absorption rate)

(나) 개발된 깔짚 소재의 안정성 평가

① 육안관찰

개발된 깔짚에서의 닭의 거동 평가를 위해 하림의 실험농장에서 5주간 1주 간격으로 육계의 거동을 관찰하였다. 깔짚별 거동의 비교를 위해 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚 처리구를 두었으며 주 별로 관찰된 계사는 Fig. 5-1에서 보는 바와 같다. 육계는 먹이를 먹을 때 이외에는 대부분 계사의 바깥쪽 부분에 자리를 잡고 있으며, 분뇨를 배설할 때도 그 자리에서 움직이지 않고 분뇨를 배설하는 것을 확인하였다. 계사의 바깥쪽 부분에 분뇨가 밀집되어 있기 때문에 계사의 중심부와 바깥쪽 부분의 수분함량이 차이가 나는 것을 관찰하였다. 육계는 깔짚을 쪼아 먹는 습관이 있는 것을 확인하였고 이에 따라 깔짚의 안정성을 확보하는 것이 중요할 것으로 판단되었다.



Fig. 5-1. 깔짚 종류에 따른 계사에서 육계의 거동 평가

개발된 깔짚에서의 소의 거동 평가를 위해 사천시 농가에서 한우의 거동을 2달간 2회 관찰하였으며, 관찰한 우사는 Fig. 5-2에 나타내었다. 깔짚을 깔아주고 1주차에는 분뇨의 배설량이 적어 전체적으로 깔짚이 건조되어 있는 상태였다. 소는 먹이를 먹기 위해 대부분의 시간을 먹이통 주변에서 생활을 하는 것을 확인하였고, 이에 따라서 기간이 지날수록 먹이통 주변의 깔짚에 많은 양의 분뇨를 배설하여 깔짚의 수분 함량이 집중적으로 높아진 것을 확인하였다.



Fig. 5-2. 바이오차 혼합깔짚 적용 우사에서 소의 거동 평가

② 깔짚 소재 자체의 안정성

최적시스템에서 제조된 깔짚의 유해성분 함량은 Table 5-3에서 보는 바와 같다. 깔짚에서 As, Cd, Cu 및 Hg는 검출되지 않았고, Cr, Ni, Pb 및 Zn은 각각 5.6, 1.2, 0.5 및 0.8 mg/kg이 검출되어 깔짚 내에 미량 함유되어 있는 것을 확인하였다. 유해성분 조사 결과 바이오차 혼합깔짚은 깔짚 규격에 부합하는 것으로 확인되었으며, 바이오차 혼합깔짚을 축사바닥 깔짚 소재로 활용하고, 이를 퇴비화하여 다시 토양에 퇴비로 적용할 시 안정성에 대한 문제는 없을 것으로 판단된다.

Table 5-3. 최적시스템에서 제조된 깔짚의 유해성분 함량

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
바이오차 혼합깔짚	ND	ND	5.6	ND	1.2	0.5	0.8	ND

(2) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템 효율 평가

(가) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템에서 퇴비생산 수율 평가

깔짚 사용 후 퇴비사 연계시스템에서 퇴비화를 하여 퇴비 생산 수율을 확인한 결과는 Fig. 5-3에서 보는 바와 같다. 퇴비생산 수율은 우사 및 계사에서 각각 41.2% 및 45.8%로 확인되었다.

(나) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템에서 생산된 퇴비의 품질특성

깔짚 사용 후 퇴비사 연계시스템에서 퇴비화를 하여 퇴비의 품질 특성을 확인한 결과는 Table 5-4 및 5-5에서 보는 바와 같다. 우분퇴비 및 계분퇴비의 특성을 확인한 결과 가축분 퇴비의 규격에 부합하여 퇴비로 활용 가능할 것으로 판단된다.

Table 5-4. 퇴비사 연계시스템에서 생산된 최종 퇴비의 이화학적 특성

	수분	염산불용해물	부숙도	염분	유기물(건조)	T-N	K	Ca	Mg	Na	P ₂ O ₅
	----- (%) -----										
우분퇴비	41.2	0.89	완료	1.78	60.2	2.17	4.95	2.61	0.88	0.77	2.75
계분퇴비	40.4	1.97	완료	0.20	66.8	2.35	0.86	0.82	0.19	0.08	1.28

Table 5-5. 퇴비사 연계시스템에서 생산된 최종 퇴비의 유해성분 함량

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
	----- (mg/kg) -----							
우분퇴비	34.2	ND	21.0	105.5	10.0	16.5	465.5	ND
계분퇴비	ND	ND	5.8	78.5	ND	ND	187.0	ND

(다) 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계시스템의 위해 물질 저감 효율 평가

깔짚 사용 후 퇴비사 연계시스템에서 퇴비화 과정에서 바이오차 혼합깔짚의 악취저감효율을 평가하기 위해 대조깔짚 대비 바이오차 혼합깔짚의 악취저감효율을 확인한 결과는 Fig. 5-3에서 보는 바와 같다. 우사에서는 톱밥깔짚 대비 바이오차 혼합깔짚 적용 시 악취저감효율이 46.7%로 확인되었으며, 계사에서는 왕겨깔짚 대비 바이오차 혼합깔짚 적용 시 악취저감효율이 50.9%로 확인되어 기존 깔짚에 비해 뛰어난 악취저감효율을 가진 것을 확인하였다.

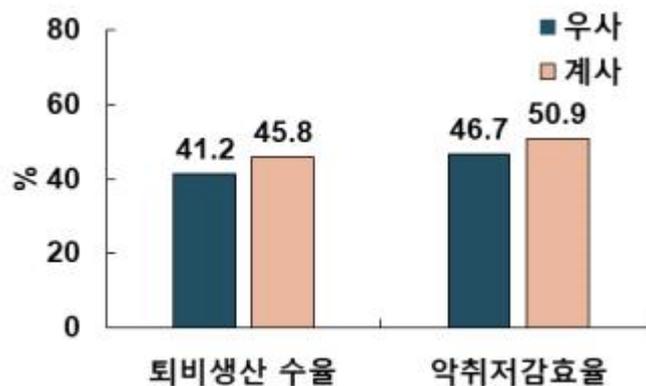


Fig. 5-3. 퇴비사 연계시스템에서 퇴비생산 수율 및 대조깔짚 대비 악취 저감 효율

(3) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가속분뇨 퇴비의 비해시험

(가) 우분 퇴비의 비해시험

① 톱밥 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험

본 시험은 ‘톱밥 깔짚 적용 우분 퇴비’의 5작물에 대한 비료피해를 확인하고자 2023년 11월 21일부터 2023년 12월 16일까지 진행되었다.

시험기간 동안 고추, 무, 배추, 상추, 완두를 21일간 총 3회에 걸쳐 조사한 결과 비료피해는 발견되지 않았으며 무처리구와 기준량구, 2배량구를 비교하여도 비료피해로 판단될 만한 증상은 없었다.

Table 5-6. 시험물질 토양혼화처리 후 비료피해 조사 결과(7일, 14일, 21일)

작물명	우분퇴비1	비료피해(0~4)			비료피해증상
		7일(12/2)	14일(12/9)	21일(12/16)	
고추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
무	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
배추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
상추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
완두	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음



2023.12.02.(1차 조사)

2023.12.09.(2차 조사)

2023.12.16.(3차 조사)

Fig. 5-4. 조사시기별 시험구 전경.

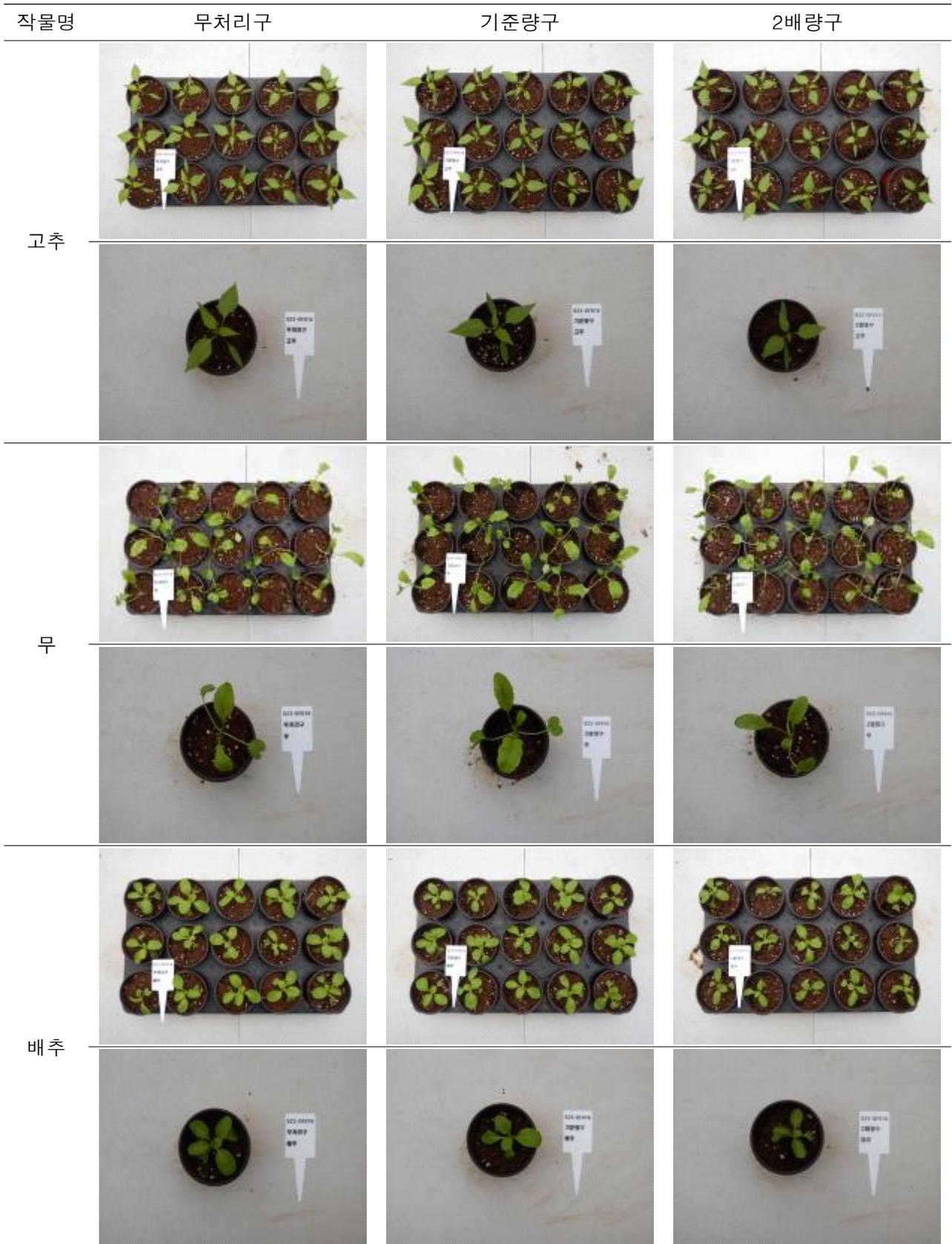


Fig. 5-5. 정식 7일 후(2023.12.02.) 작물 사진(계속).

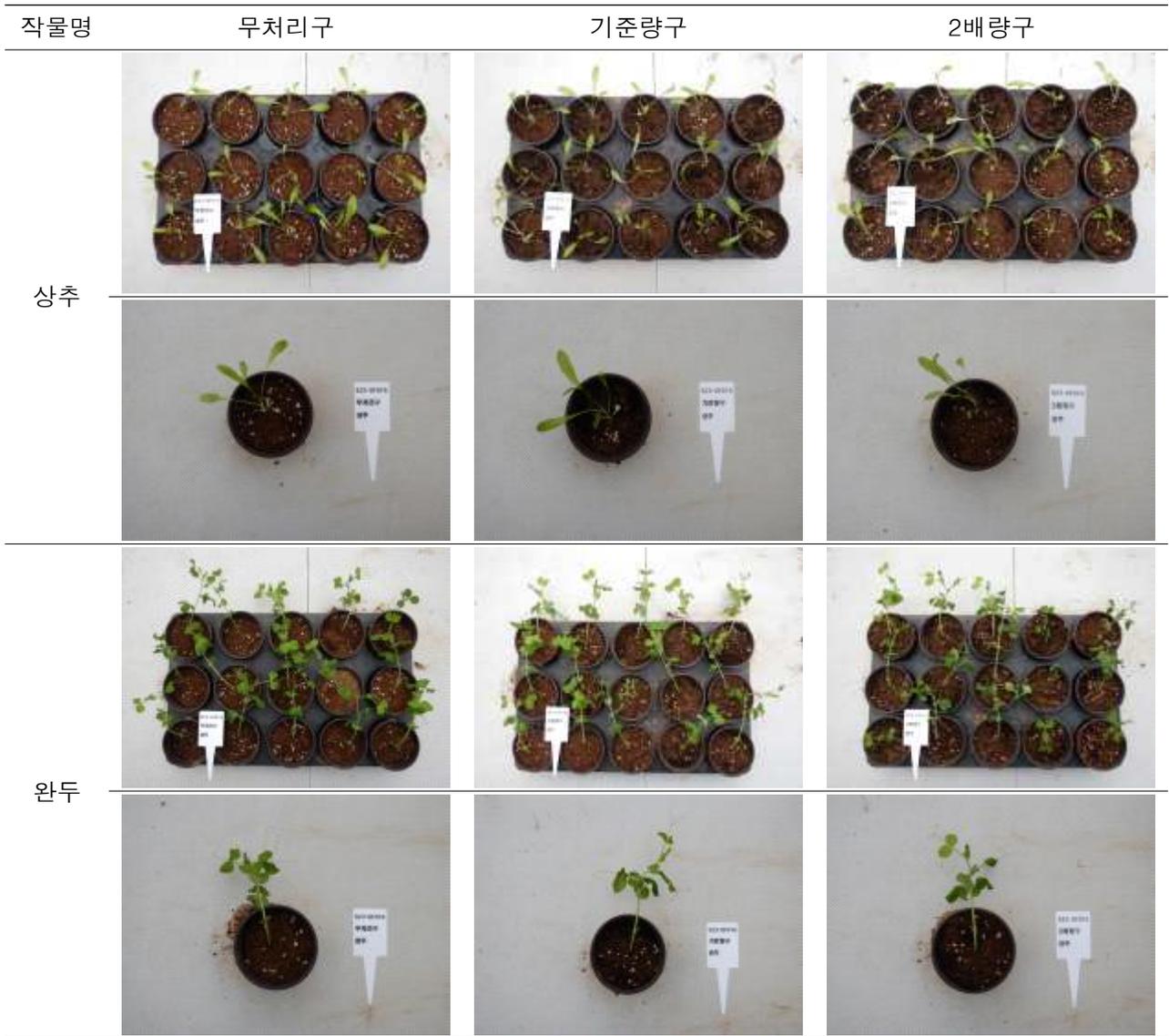


Fig. 5-5. 정식 7일 후(2023.12.02.) 작물 사진.

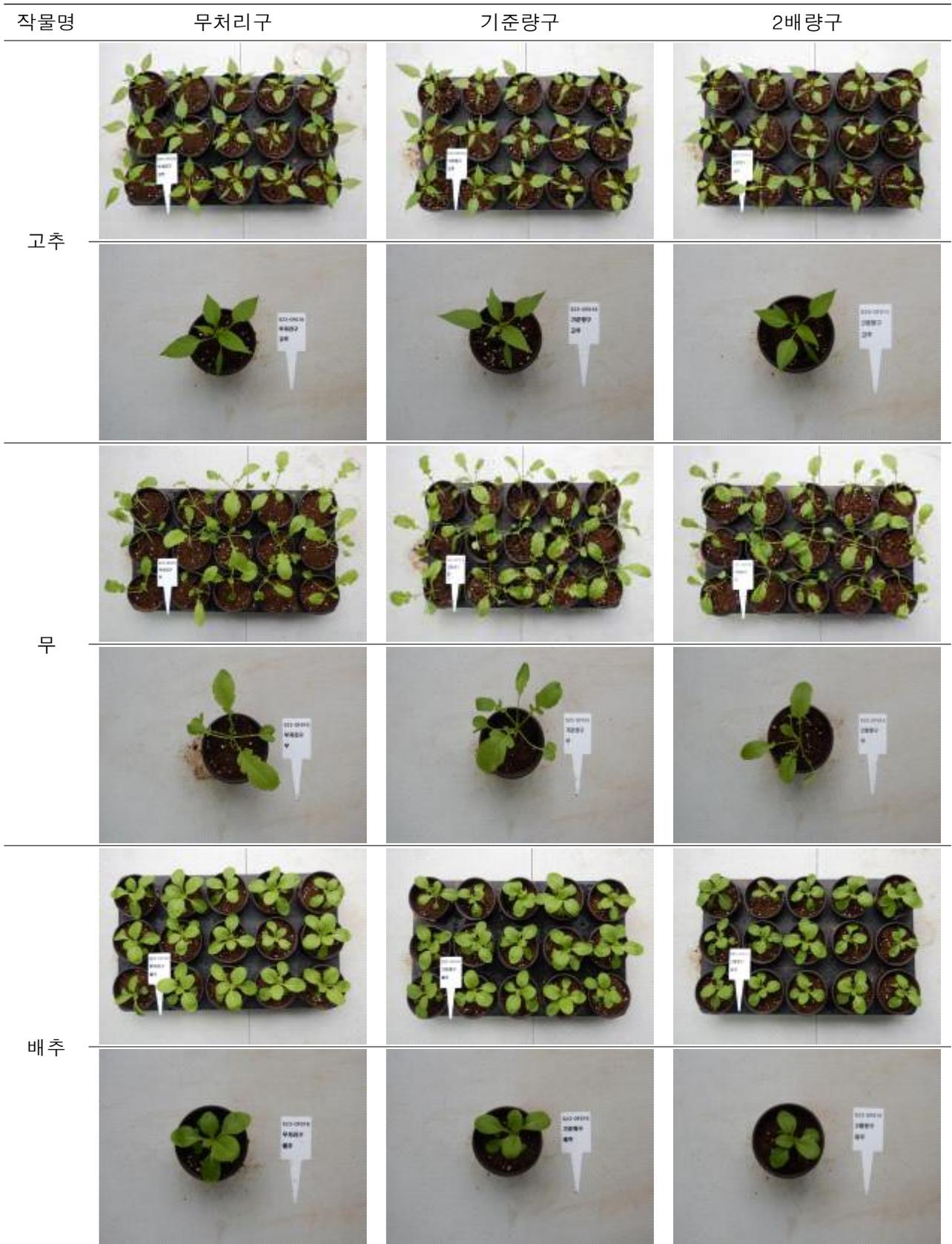


Fig. 5-6. 정식 14일 후(2023.12.09.) 작물 사진(계속).

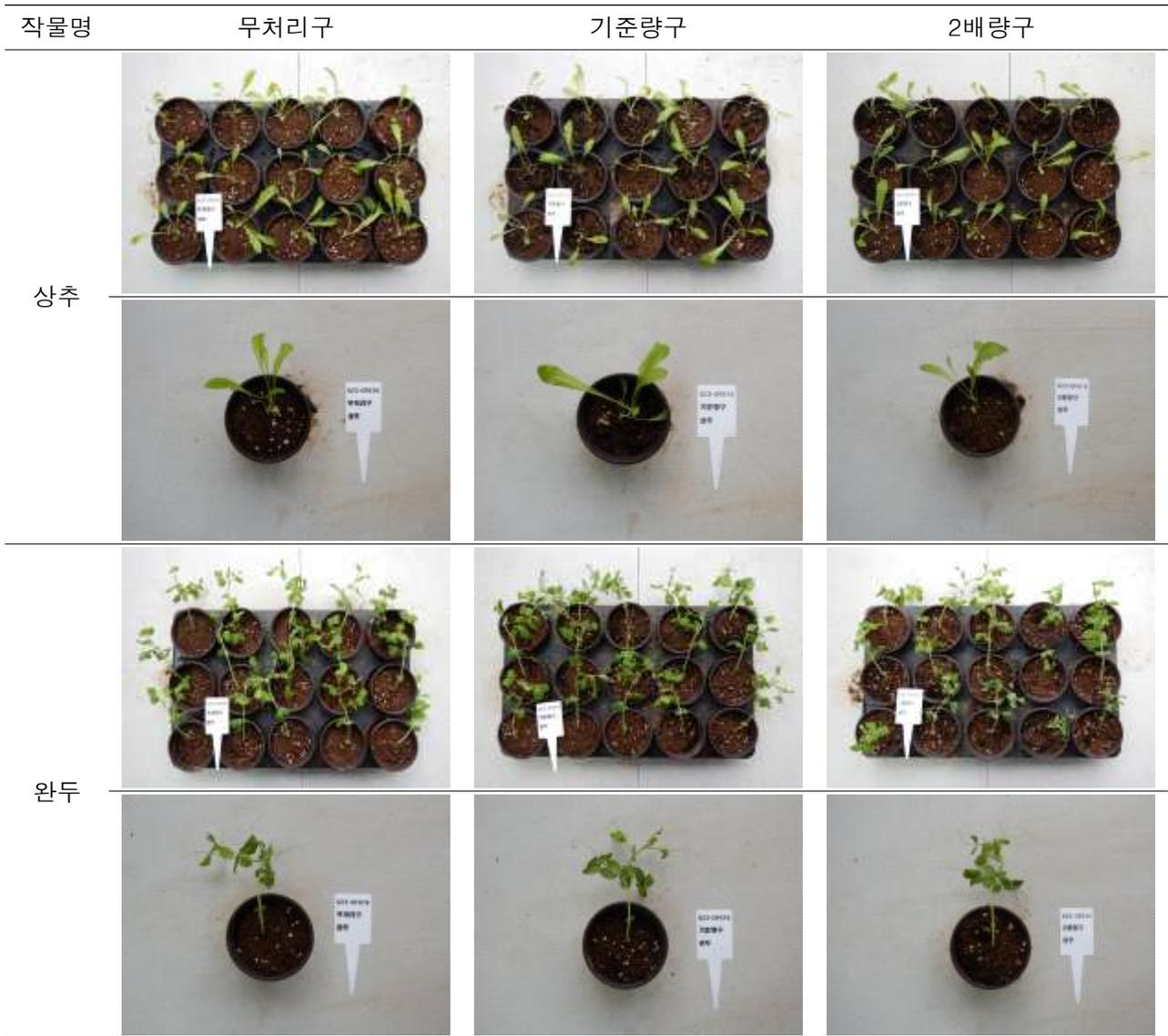


Fig. 5-6. 정식 14일 후(2023.12.09.) 작물 사진.

작물명	무처리구	기준량구	2배량구
고추			
			
무			
			
배추			
			

Fig. 5-7. 정식 21일 후(2023.12.16.) 작물 사진(계속).



Fig. 5-7. 정식 21일 후(2023.12.16.) 작물 사진.

② 혼합 깔짚 적용 우분 퇴비의 비해시험

본 시험은 ‘혼합 깔짚 적용 우분 퇴비’의 5작물에 대한 비료피해를 확인하고자 2023년 11월 30일부터 2023년 12월 25일까지 진행되었다.

시험기간 동안 고추, 무, 배추, 상추, 완두를 21일간 총 3회에 걸쳐 조사한 결과 고추, 무, 배추, 상추의 비료피해는 발견되지 않았으나, 완두의 2차조사시 2배량구에서 일부 시들음 증상이 발견되었고, 3차조사 시 2배량구에서 시들음 증상이 확산된 것을 확인하여 퇴비 시용량을 조절할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Table 5-7. 시험물질 토양혼화처리 후 비료피해 조사 결과(7일, 14일, 21일)

작물명	우분퇴비2	비료피해(0~4)			비료피해증상
		7일(12/11)	14일(12/18)	21일(12/25)	
고추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
무	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
배추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
상추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
완두	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	1	2	시들음



2023.12.11.(1차 조사)



2023.12.18.(2차 조사)



2023.12.25.(3차 조사)

Fig. 5-8. 조사시기별 시험구 전경.

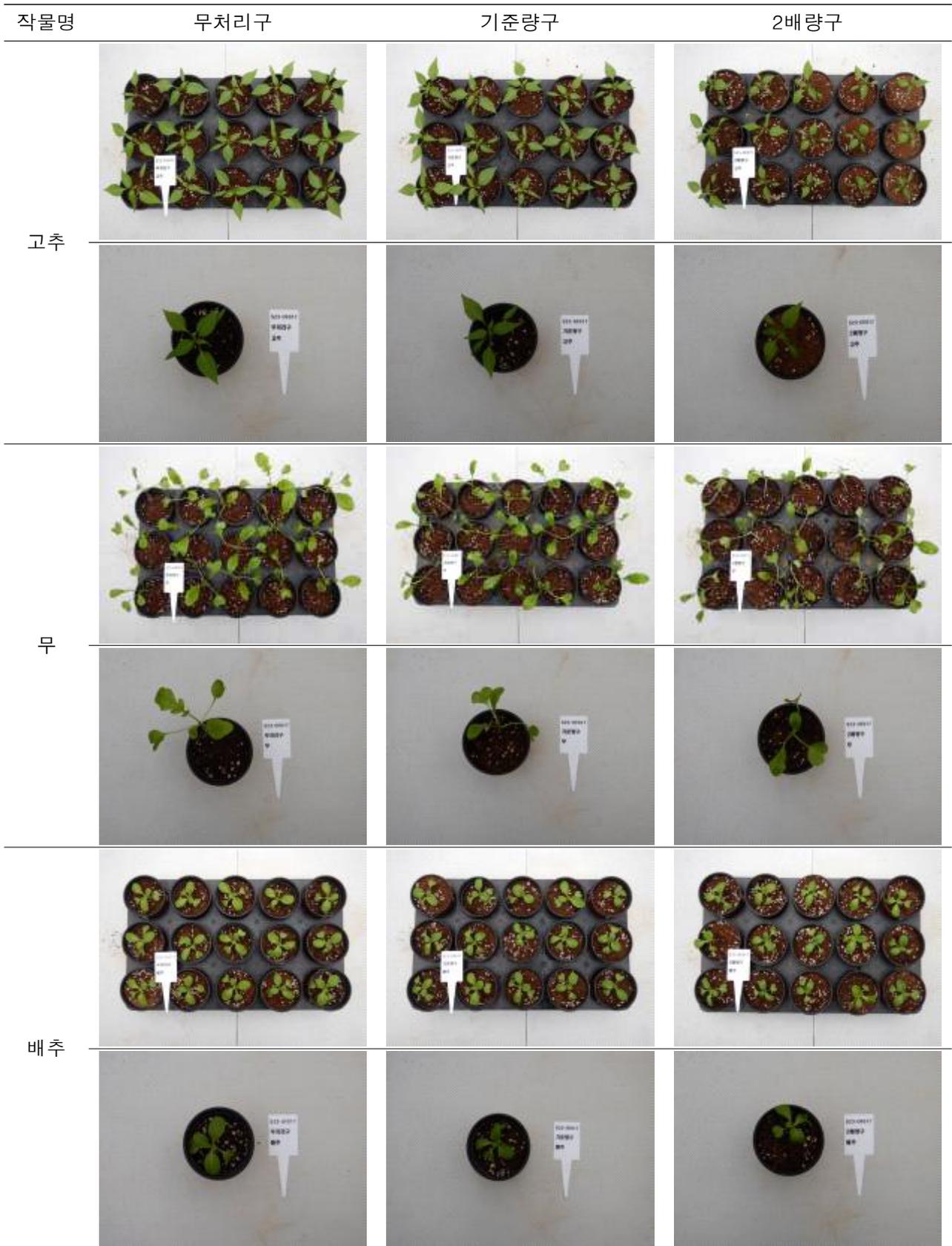


Fig. 5-9. 정식 7일 후(2023.12.11.) 작물 사진(계속).

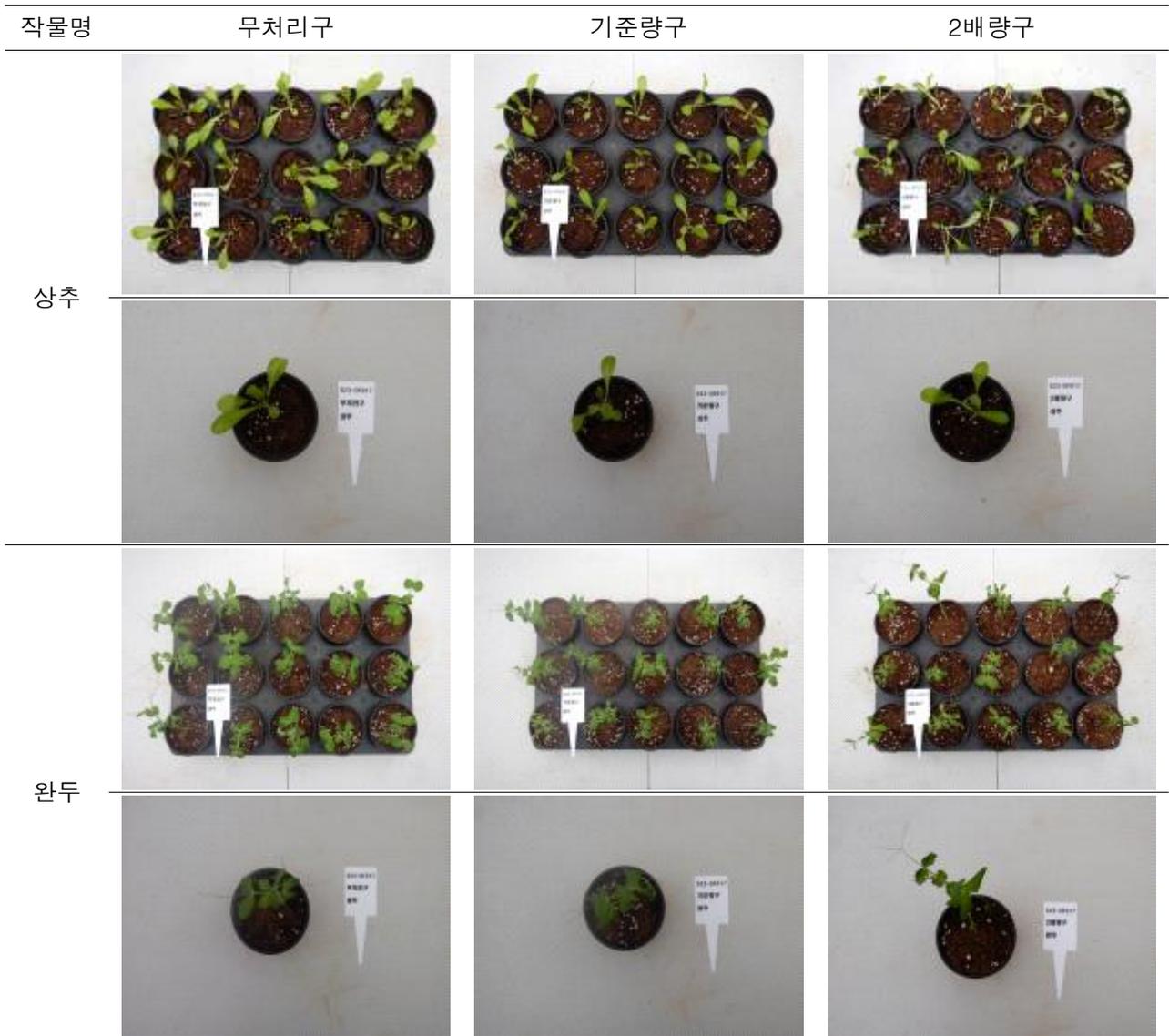


Fig. 5-9. 정식 7일 후(2023.12.11.) 작물 사진.

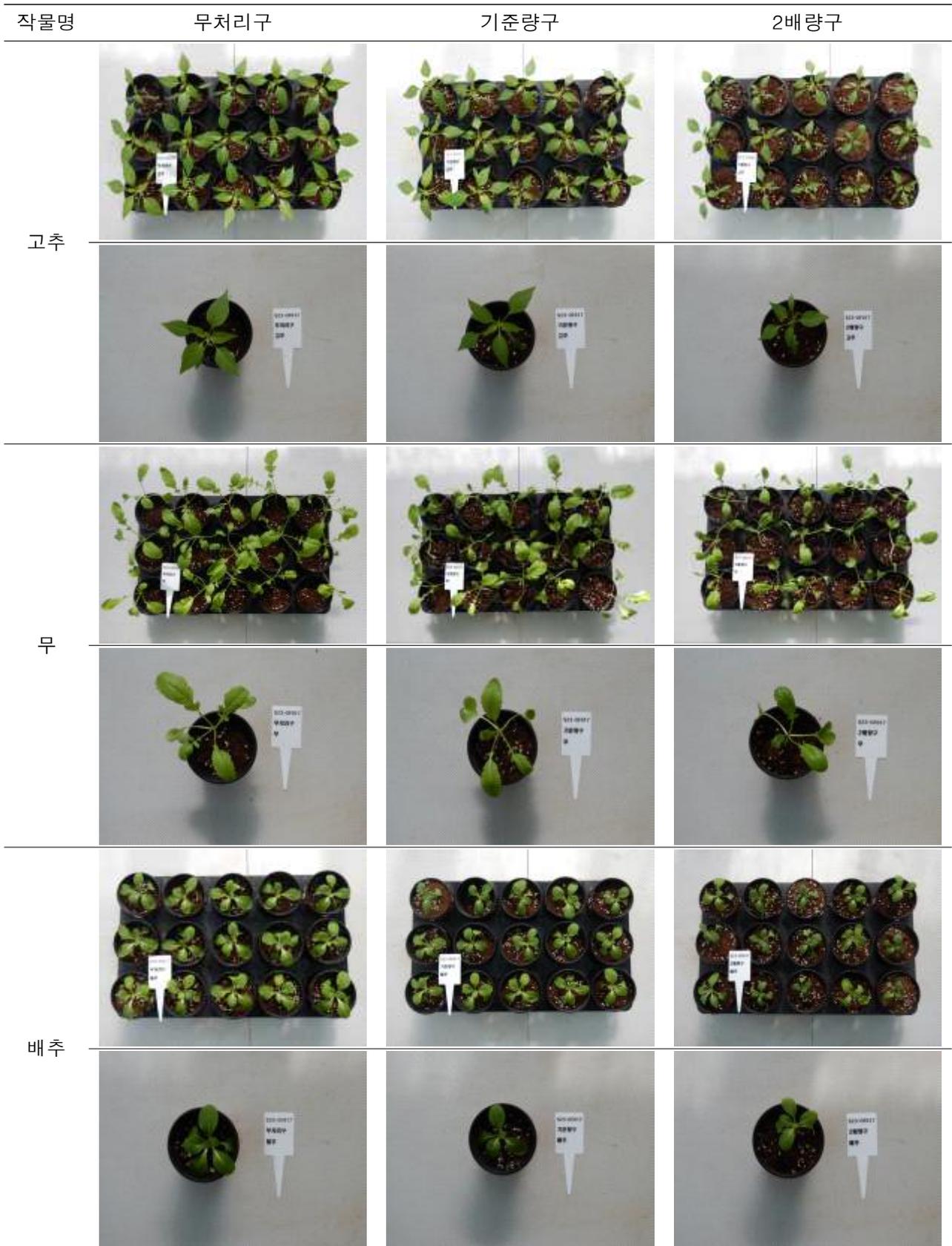


Fig. 5-10. 정식 14일 후(2023.12.18.) 작물 사진(계속).

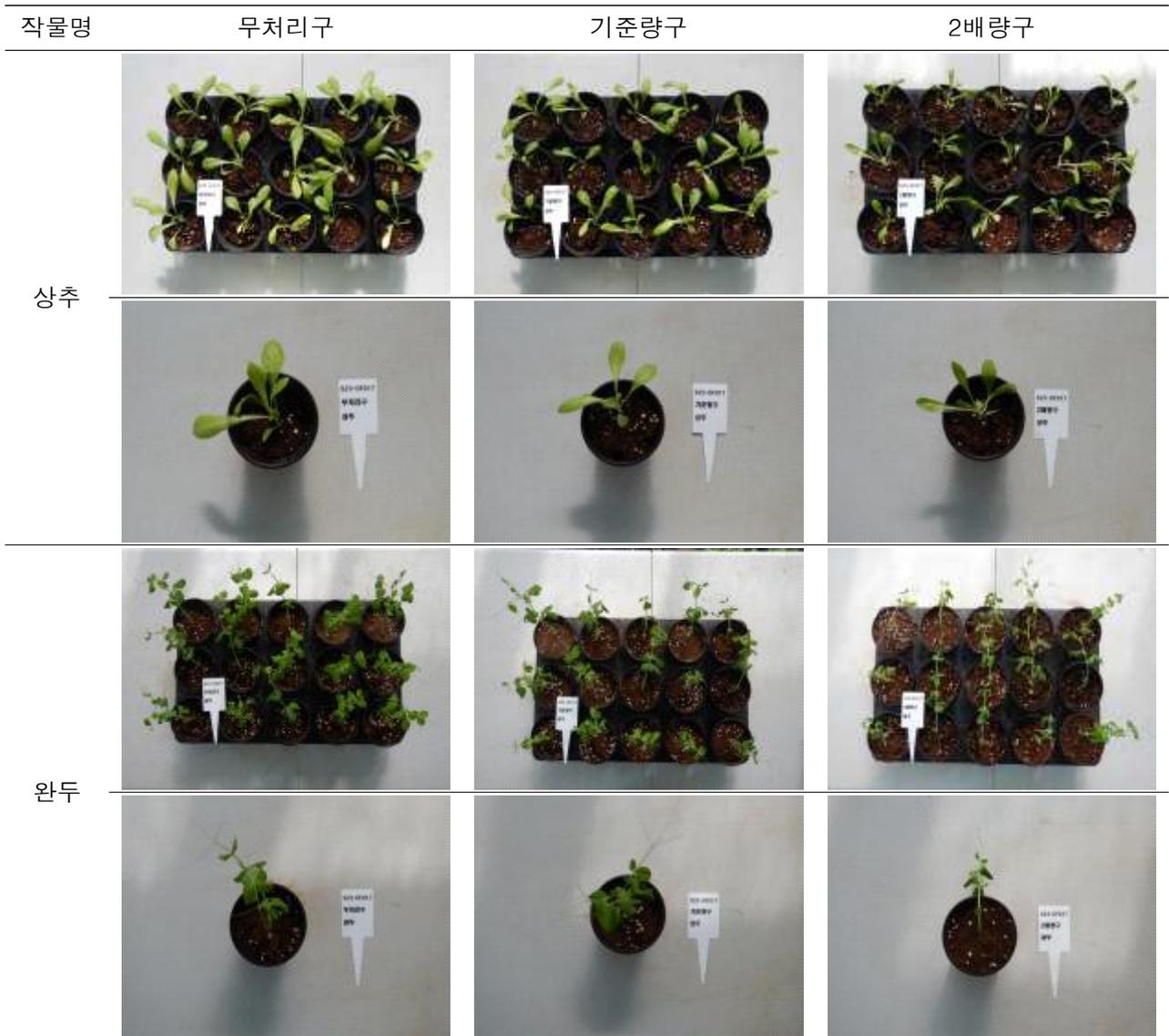


Fig. 5-10. 정식 14일 후(2023.12.18.) 작물 사진.

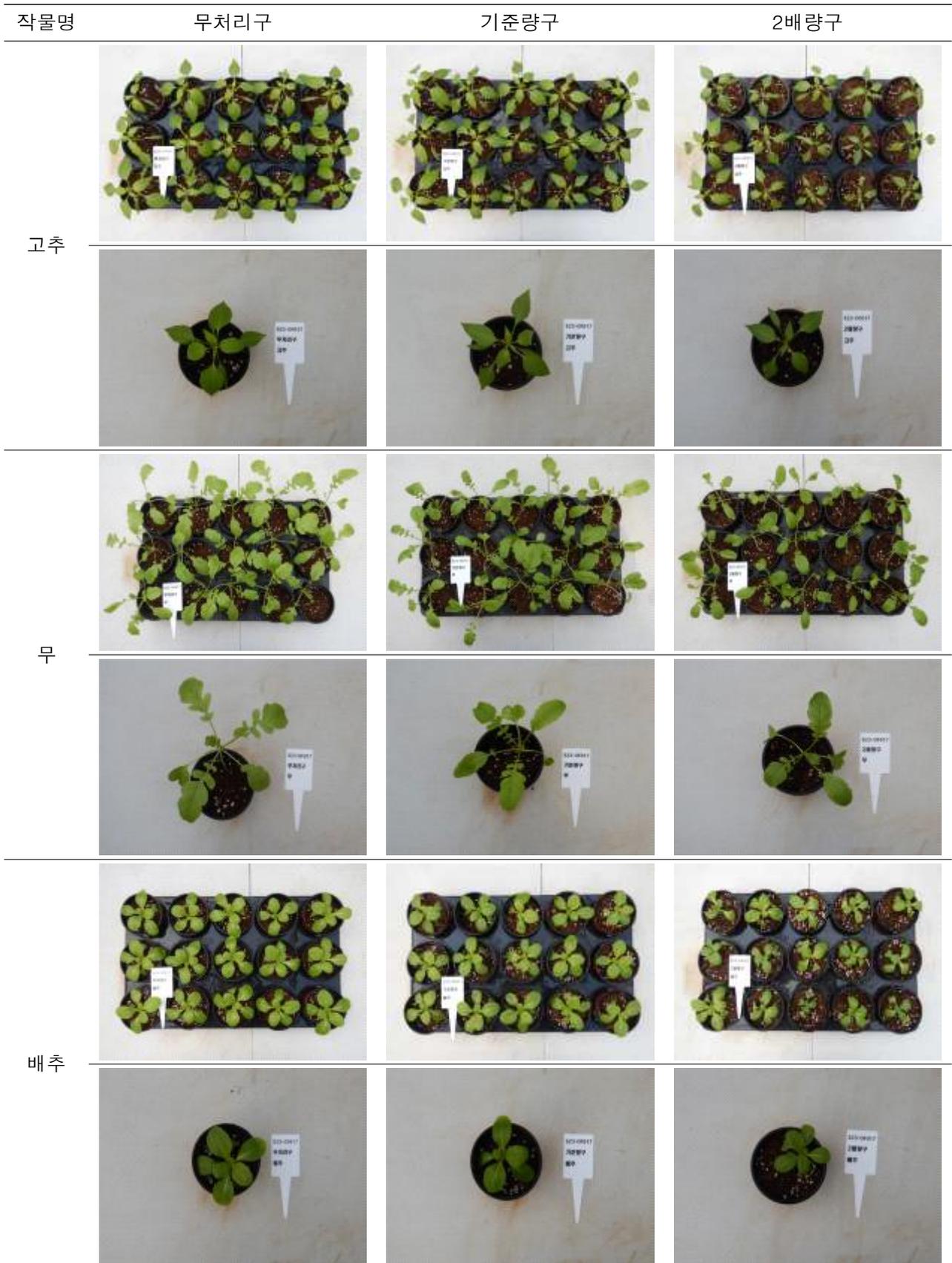


Fig. 5-11. 정식 21일 후(2023.12.25.) 작물 사진(계속).

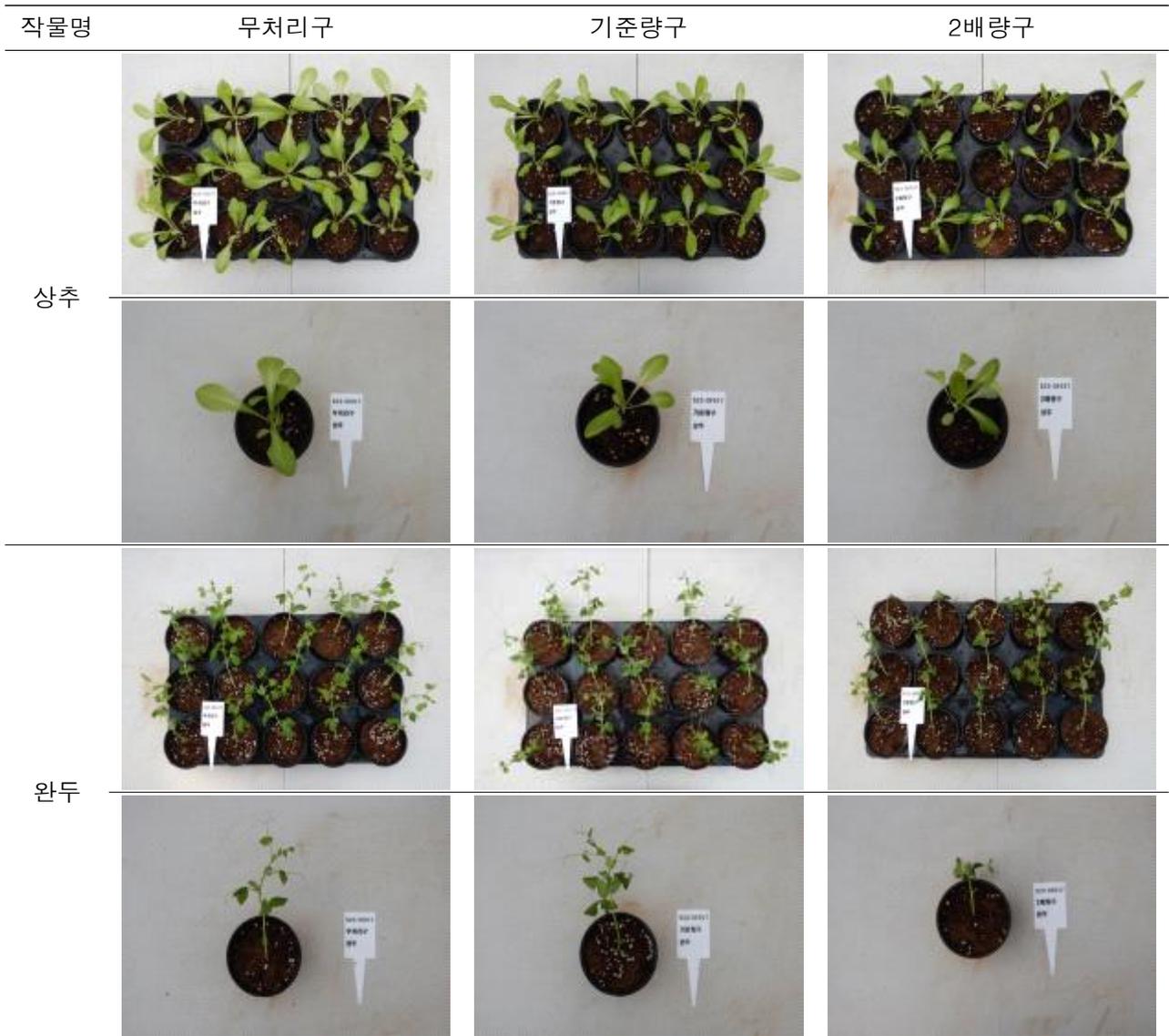


Fig. 5-11. 정식 21일 후(2023.12.25.) 작물 사진.

(나) 계분 퇴비의 비해시험

① 왕겨 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해시험

본 시험은 ‘왕겨 깔짚 적용 계분 퇴비’의 5작물에 대한 비료피해를 확인하고자 2023년 09월 18일부터 2023년 10월 12일까지 진행되었다.

시험기간 동안 고추, 무, 배추, 상추, 완두를 21일간 총 3회에 걸쳐 조사한 결과 2차조사시 섬서구메뚜기로 인해 배추와 고추의 기준량구에서 일부 잎이 소실되는 피해가 있었으나, 그 외 비료피해는 발견되지 않았으며 무처리구와 기준량구, 2배량구를 비교하여도 비료피해로 판단될 만한 증상은 없었다.

Table 5-8. 시험물질 토양혼화처리 후 비료피해 조사 결과(7일, 14일, 21일)

작물명	계분퇴비1	비료피해(0~4)			비료피해증상
		7일(9/28)	14일(10/5)	21일(10/12)	
고추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
무	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
배추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
상추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
완두	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음



Fig. 5-12. 조사시기별 시험구 전경.

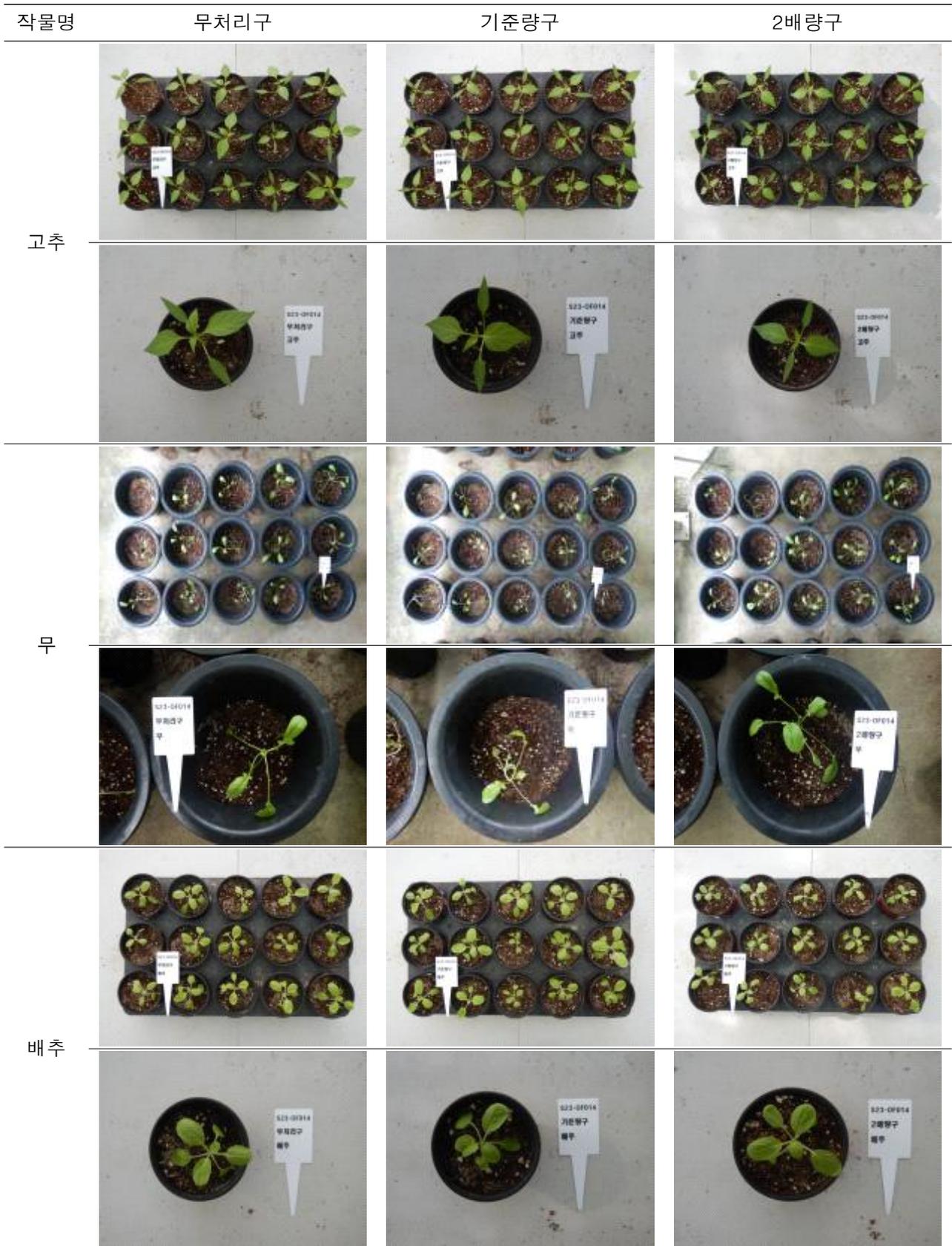


Fig. 5-13. 정식 7일 후(2023.09.28.) 작물 사진(계속)

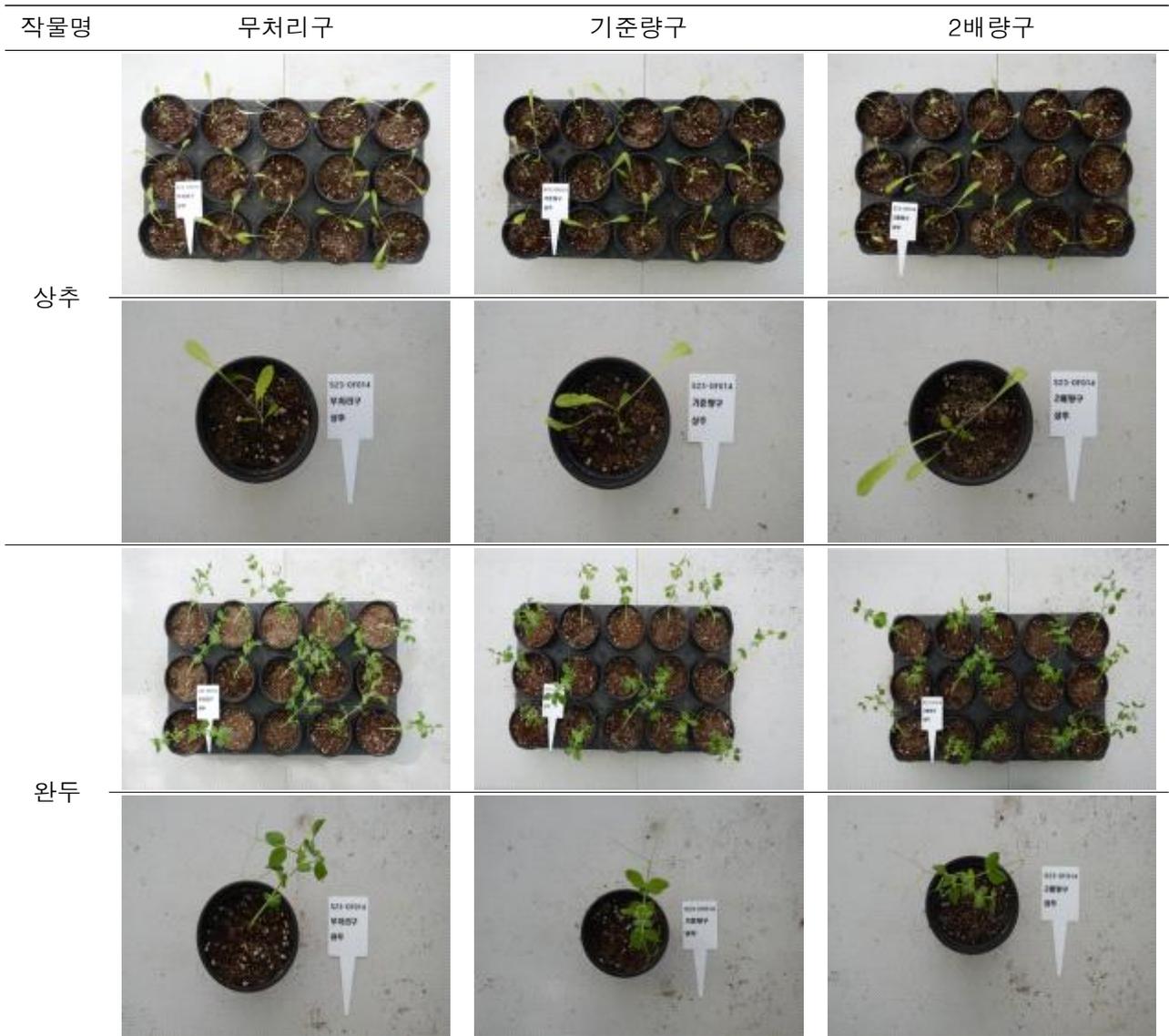


Fig. 5-13. 정식 7일 후(2023.09.28.) 작물 사진

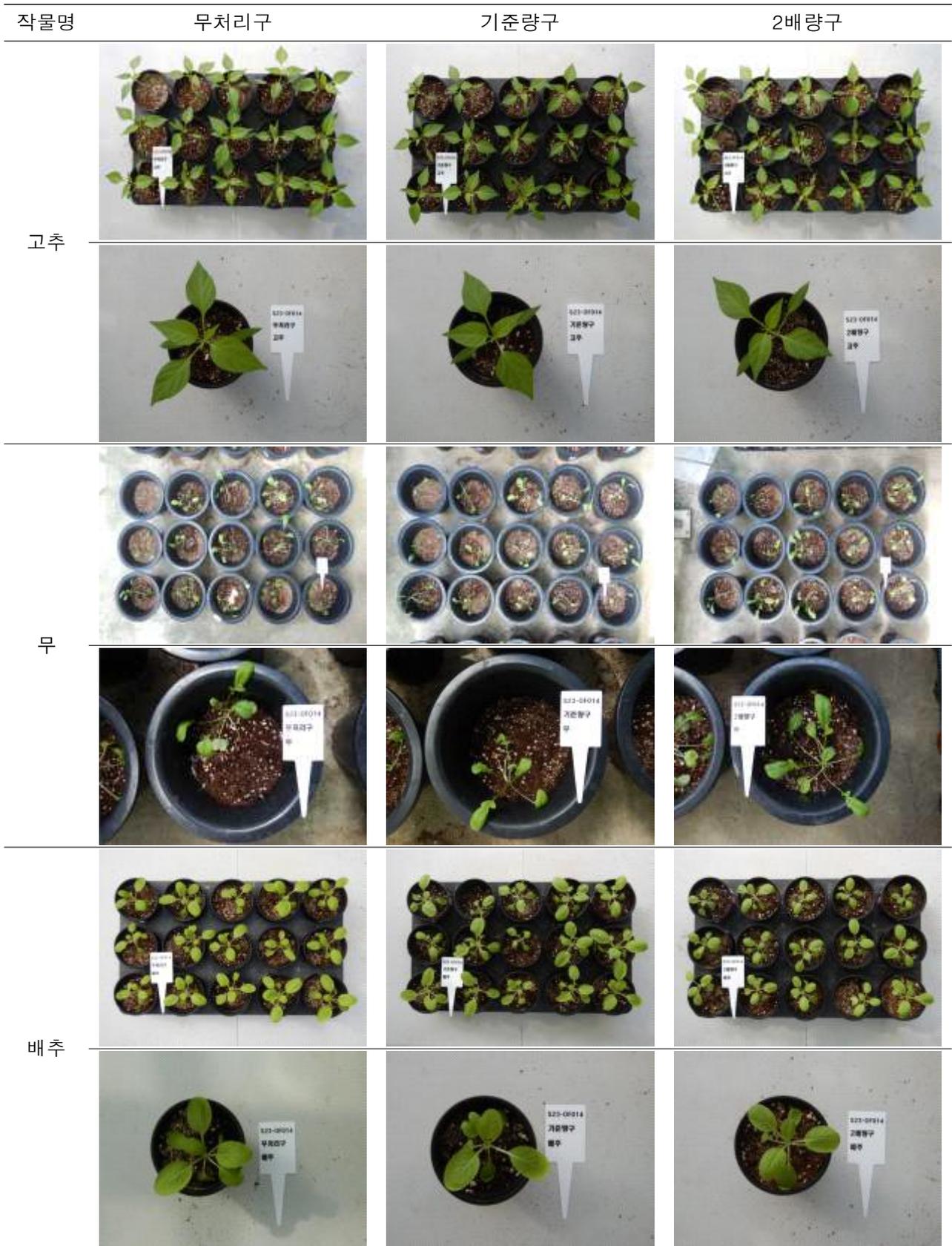


Fig. 5-14. 정식 14일 후(2023.10.05.) 작물 사진(계속)

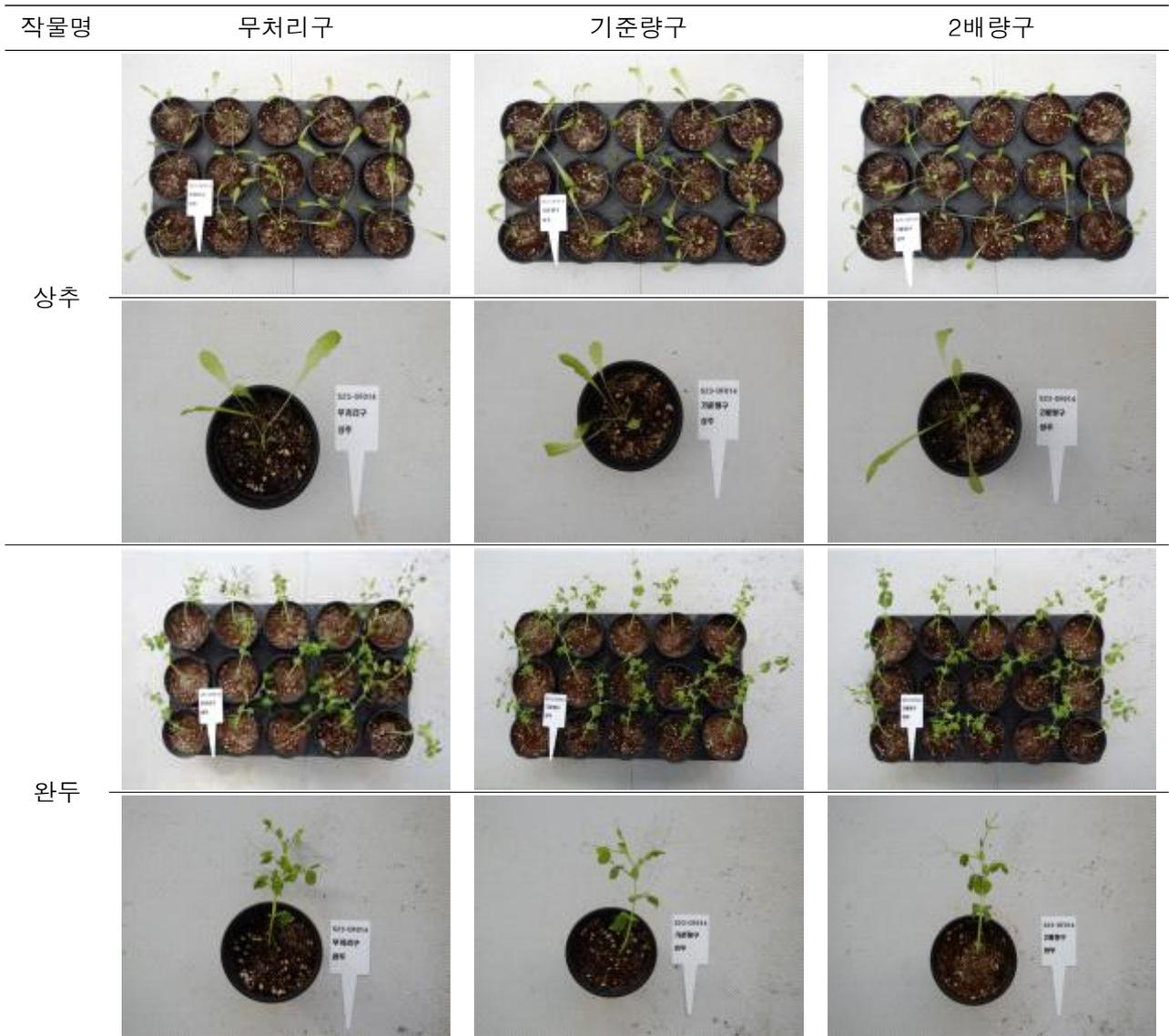


Fig. 5-14. 정식 14일 후(2023.10.05.) 작물 사진

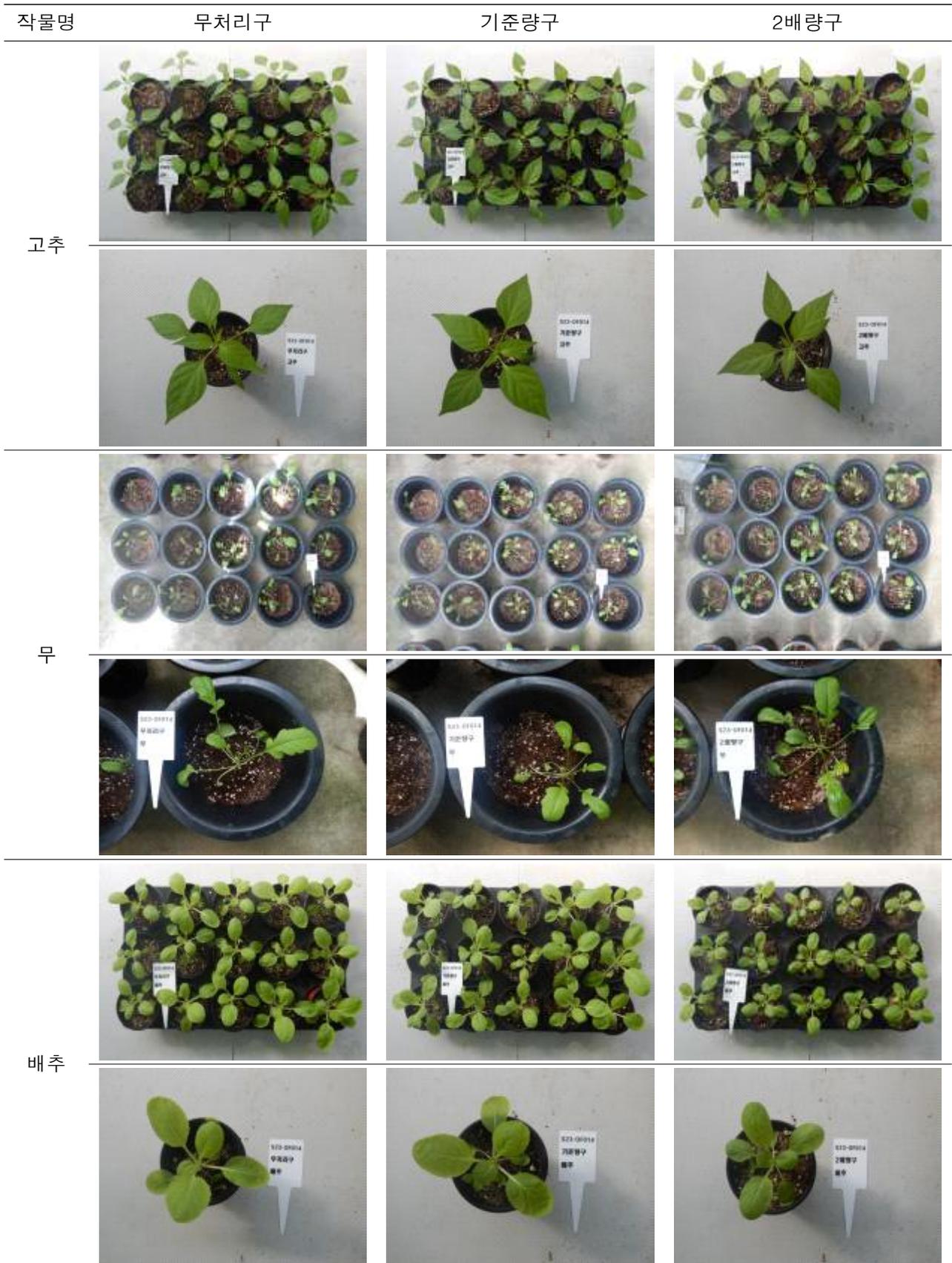


Fig. 5-15. 정식 21일 후(2023.10.12.) 작물 사진(계속).

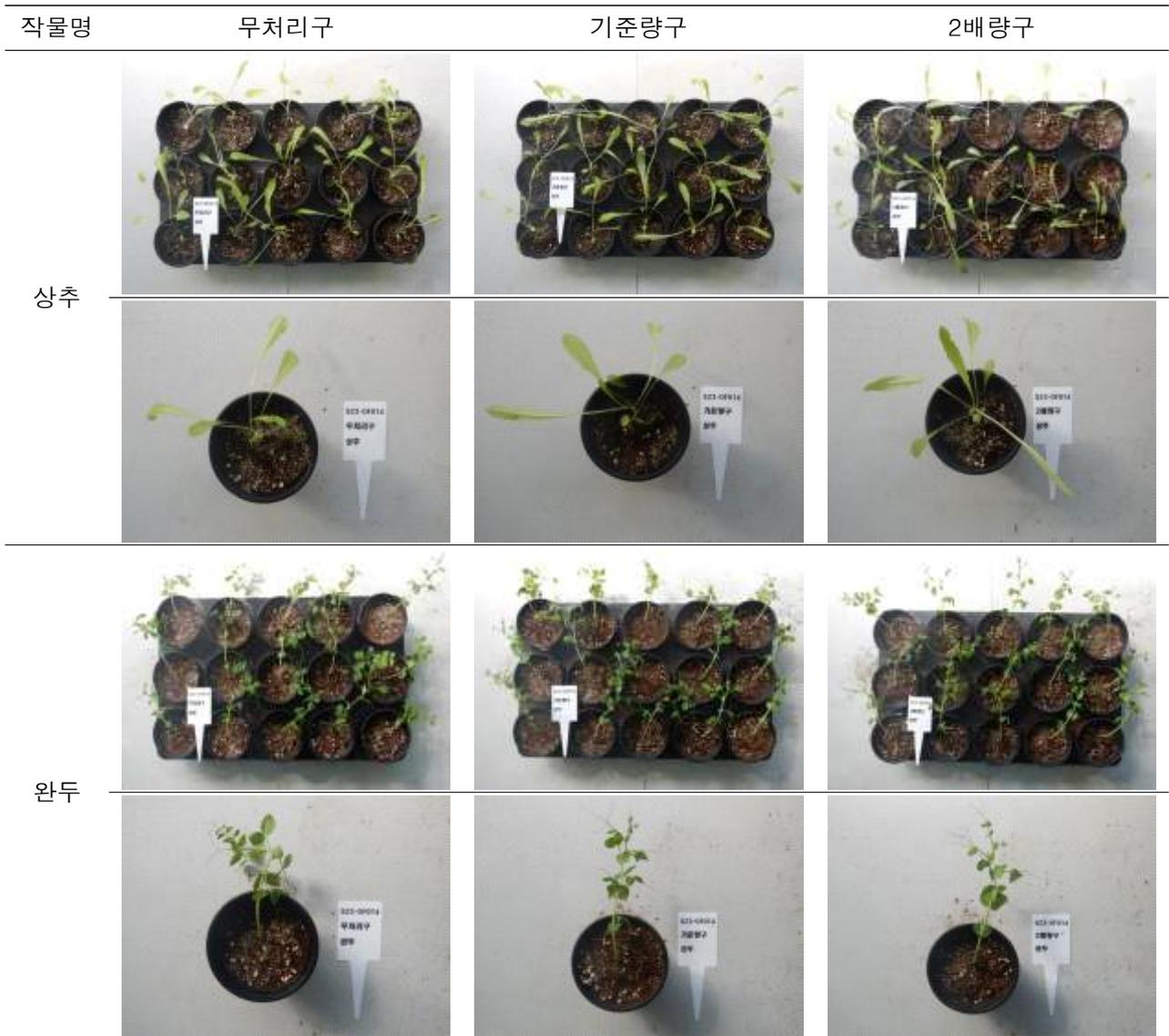


Fig. 5-15. 정식 21일 후(2023.10.12.) 작물 사진.



Fig. 5-16. 해충으로 인한 피해

② 혼합 깔짚 적용 계분 퇴비의 비해서험

본 시험은 ‘혼합 깔짚 적용 계분 퇴비’의 5작물에 대한 비료피해를 확인하고자 2023년 10월 16일부터 2023년 11월 08일까지 진행되었다.

시험기간 동안 고추, 무, 배추, 상추, 완두를 21일간 총 3회에 걸쳐 조사한 결과 비료피해는 발견되지 않았으며 무처리구와 기준량구, 2배량구를 비교하여도 비료피해로 판단될 만한 증상은 없었다.

Table 5-9. 시험물질 토양혼화처리 후 비료피해 조사 결과(7일, 14일, 21일)

작물명	계분퇴비2	비료피해(0~4)			비료피해증상
		7일(10/25)	14일(11/01)	21일(11/08)	
고추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
무	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
배추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
상추	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음
완두	무처리구	0	0	0	-
	기준량구	0	0	0	없음
	2배량구	0	0	0	없음



2023.10.25.(1차 조사)



2023.11.01.(2차 조사)



2023.11.08.(3차 조사)

Fig. 5-17. 조사시기별 시험구 전경.

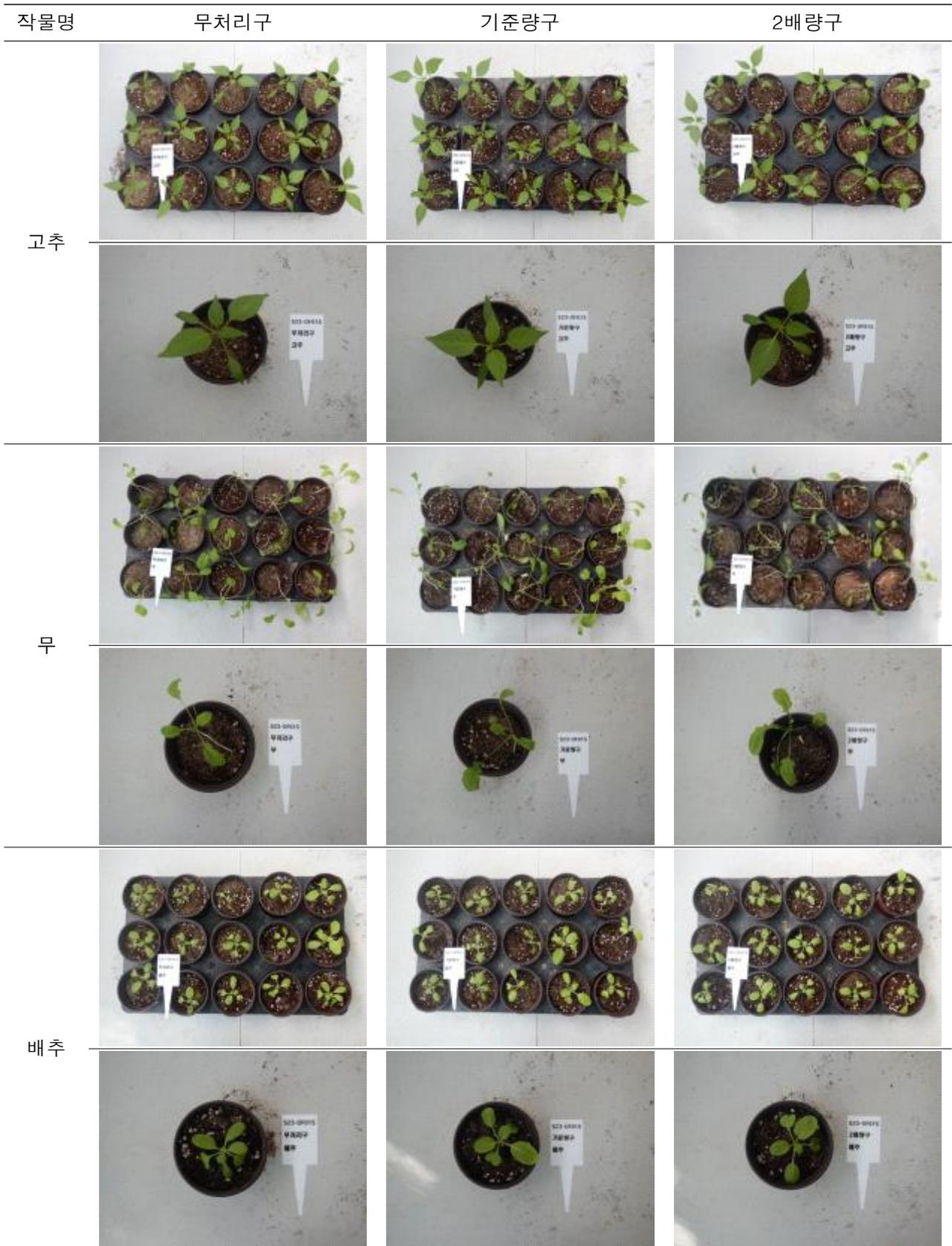


Fig. 5-18. 정식 7일 후(2023.10.25.) 작물 사진(계속).

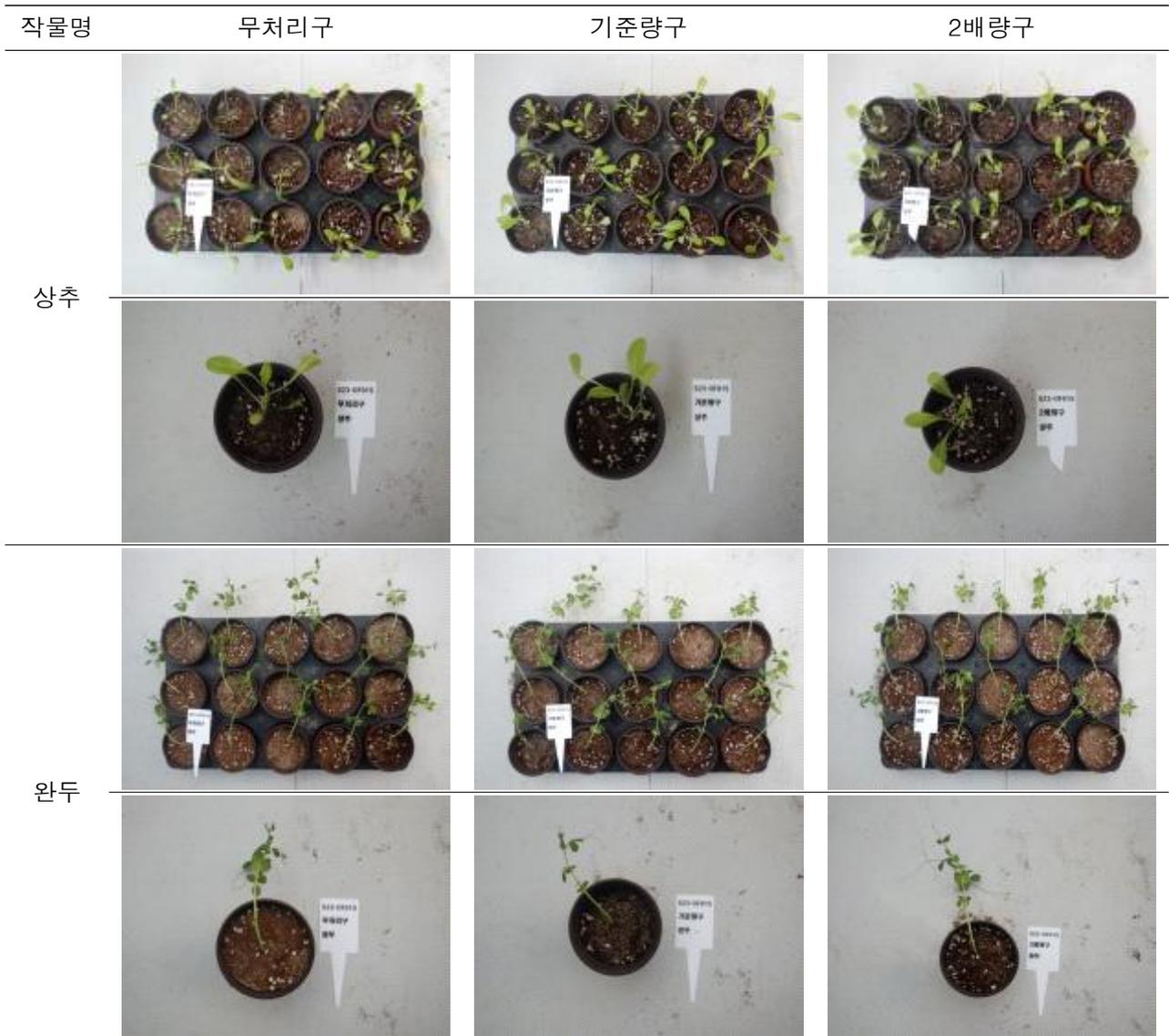


Fig. 5-18. 정식 7일 후(2023.10.25.) 작물 사진.

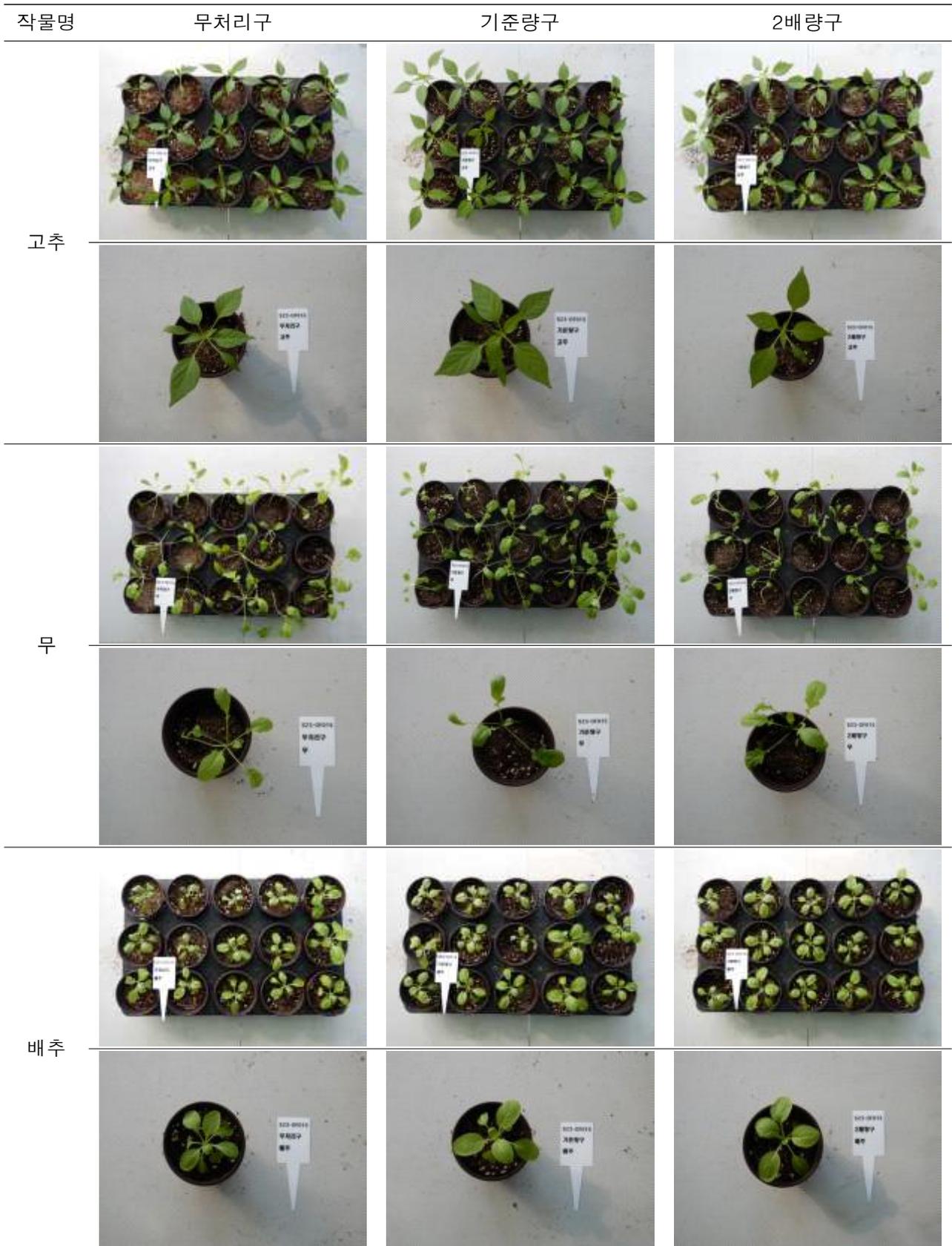


Fig. 5-19. 정식 14일 후(2023.11.01.) 작물 사진(계속).

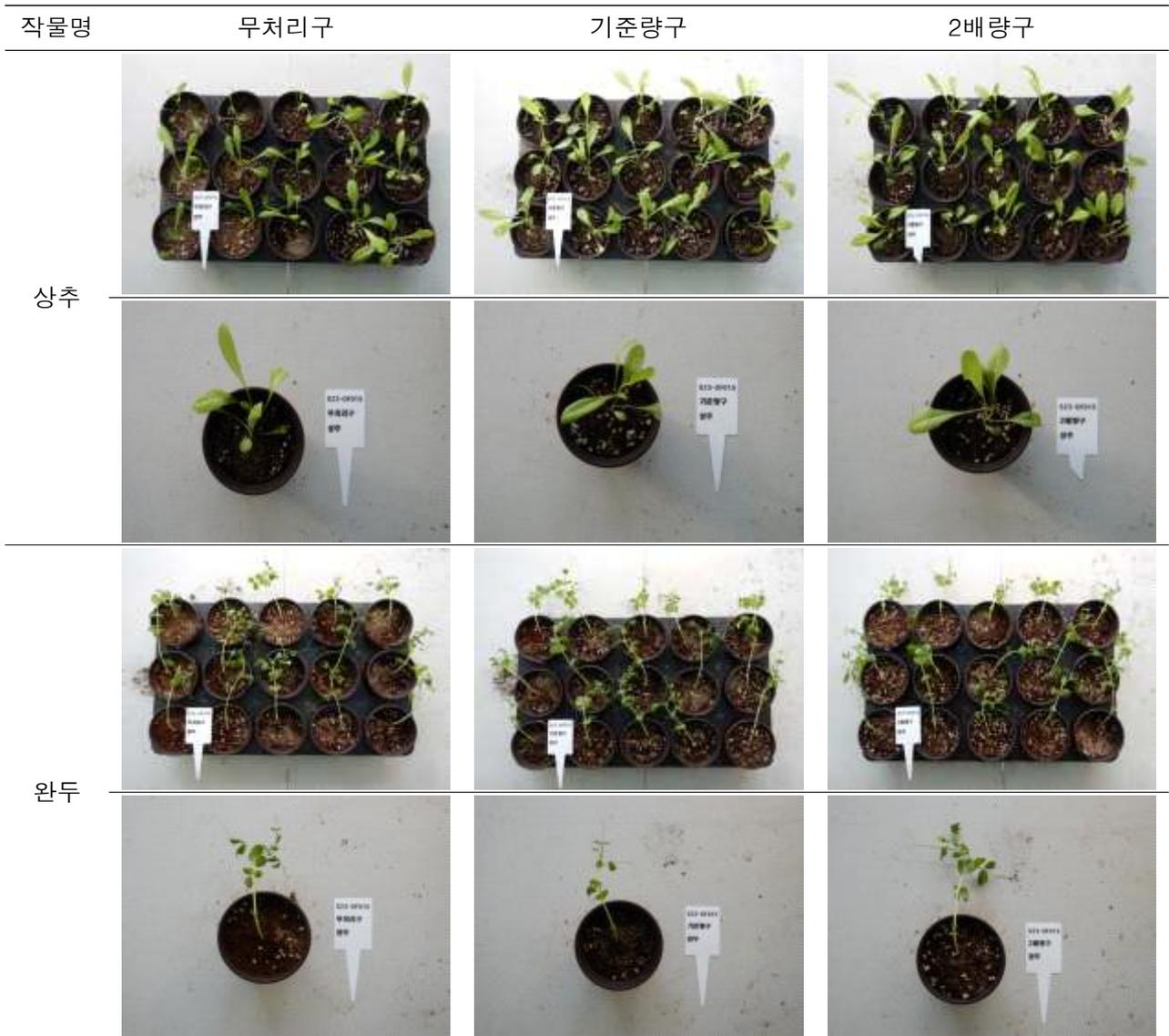


Fig. 5-19. 정식 14일 후(2023.11.01.) 작물 사진.

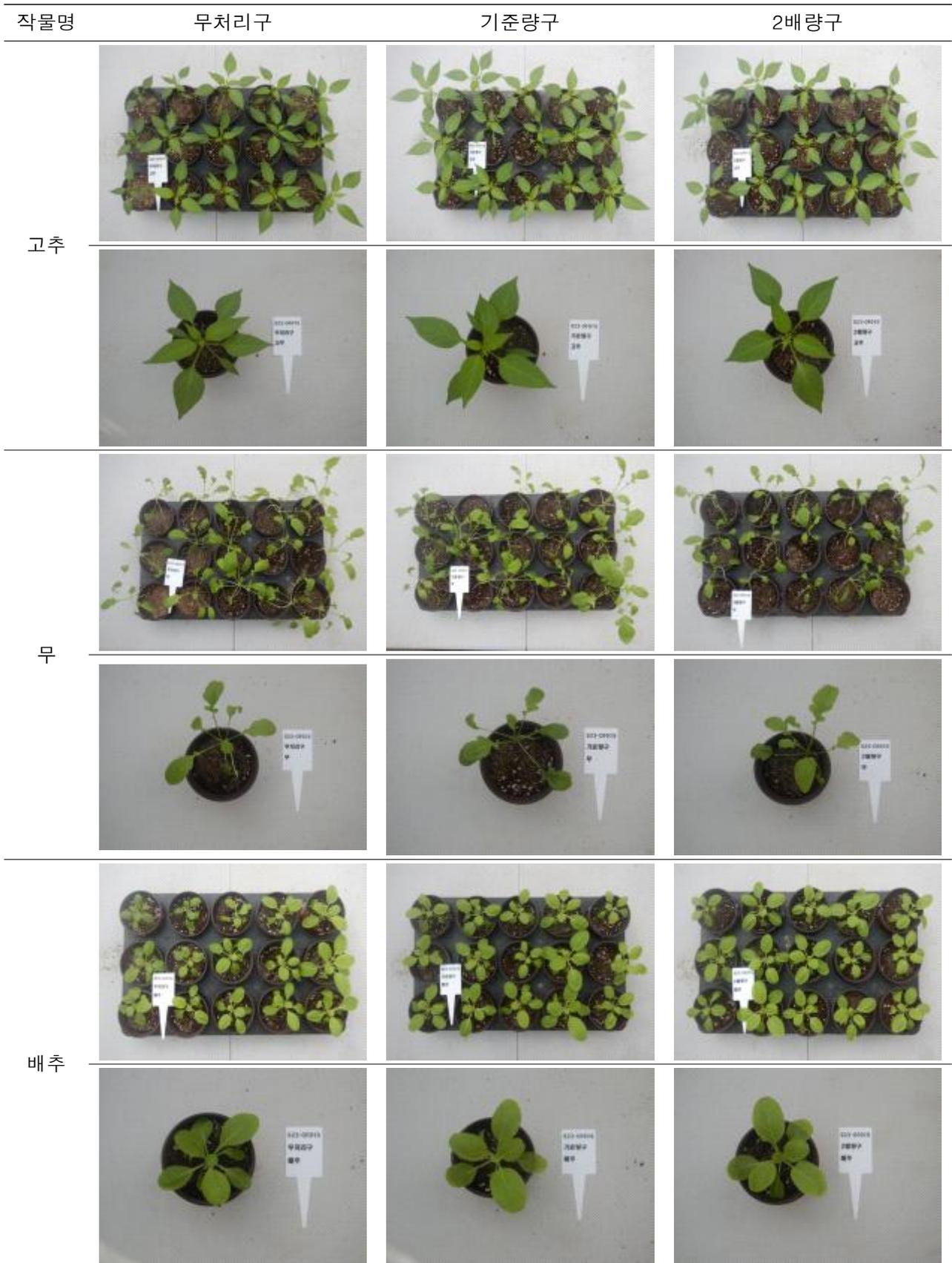


Fig. 5-20. 정식 21일 후(2023.11.08.) 작물 사진(계속).

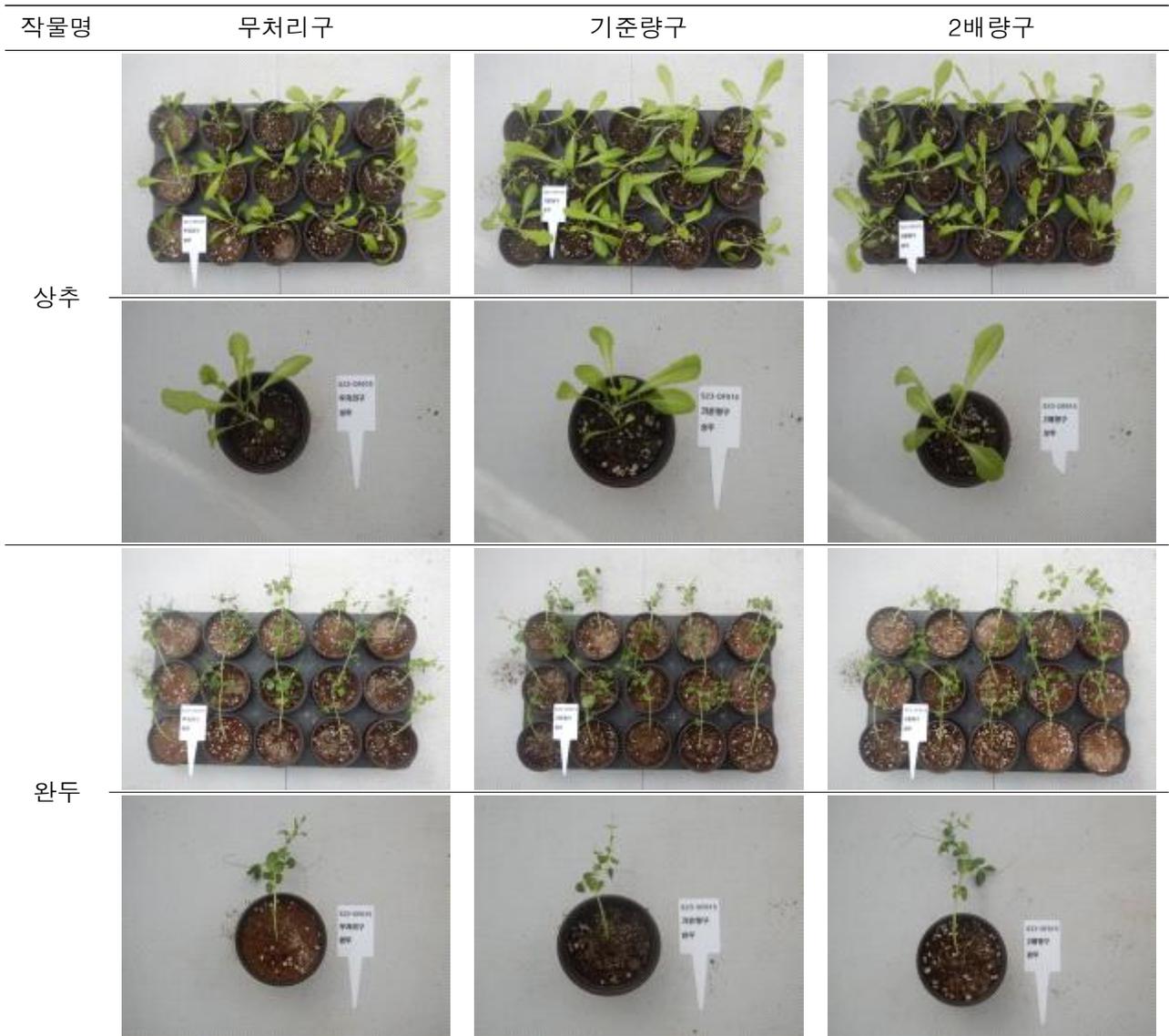


Fig. 5-20. 정식 21일 후(2023.11.08.) 작물 사진.

(4) 축사바닥 깔짚 소재 적용 가축분뇨 퇴비의 현장 재배 시험

(가) 일반 노지에서 작물 재배시험

① 재배된 작물수량 및 무기성분 조사

2000 kg/10a 처리량 기준, 관용퇴비 (C), 톱밥퇴비 (SC), 바이오차 혼합깔짚퇴비 (MC)의 배추 수확량을 비교했을 때, 세 가지 퇴비 모두 NPK 처리구보다 생육이 저조하였다. 퇴비 중에서는 톱밥퇴비의 생육이 가장 좋았으며 NPK 처리구와 가장 유사한 수확량을 나타냈다. 배추 수확 후 사진에서 보는 바와 같이, 퇴비 처리구가 NPK 처리구에 비하여 비교적 크기가 작았지만 톱밥퇴비와 바이오차 혼합깔짚퇴비는 NPK 처리구와 크기가 유사하였으며 결구 상태가 더 좋은 모습을 보였다.

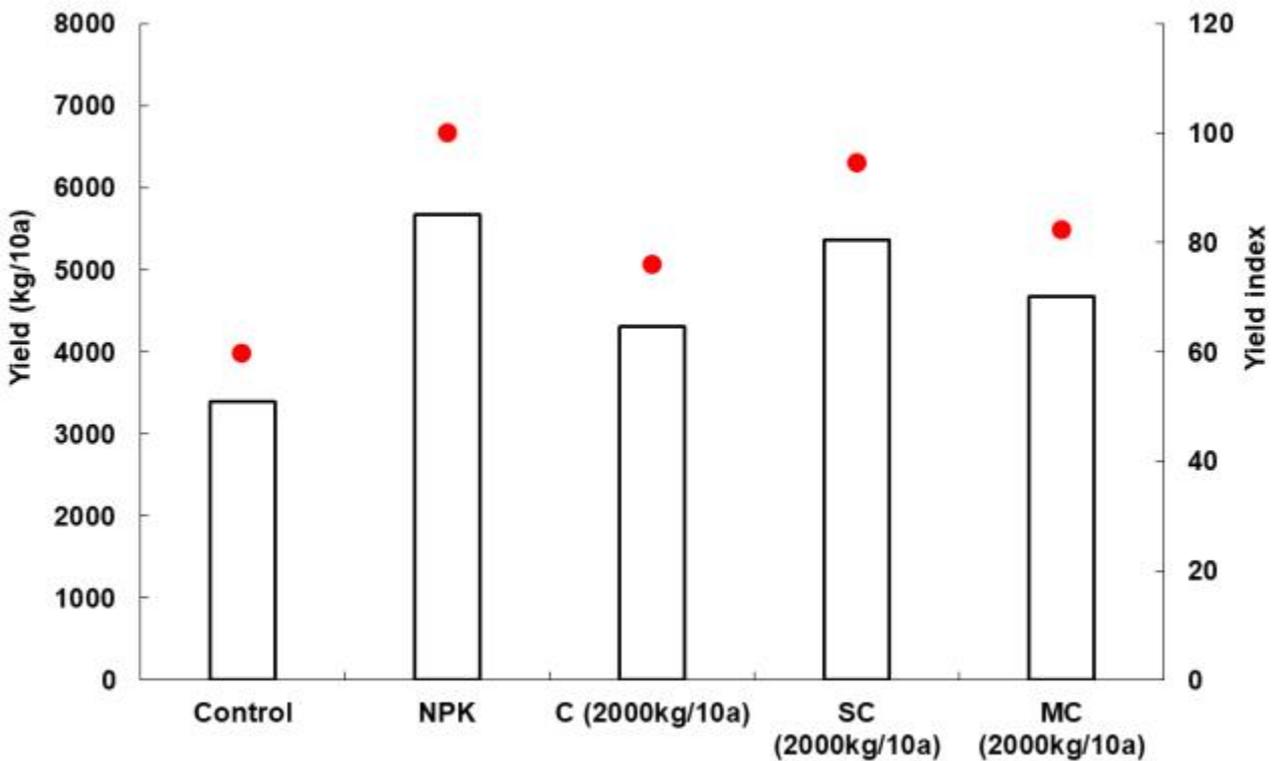
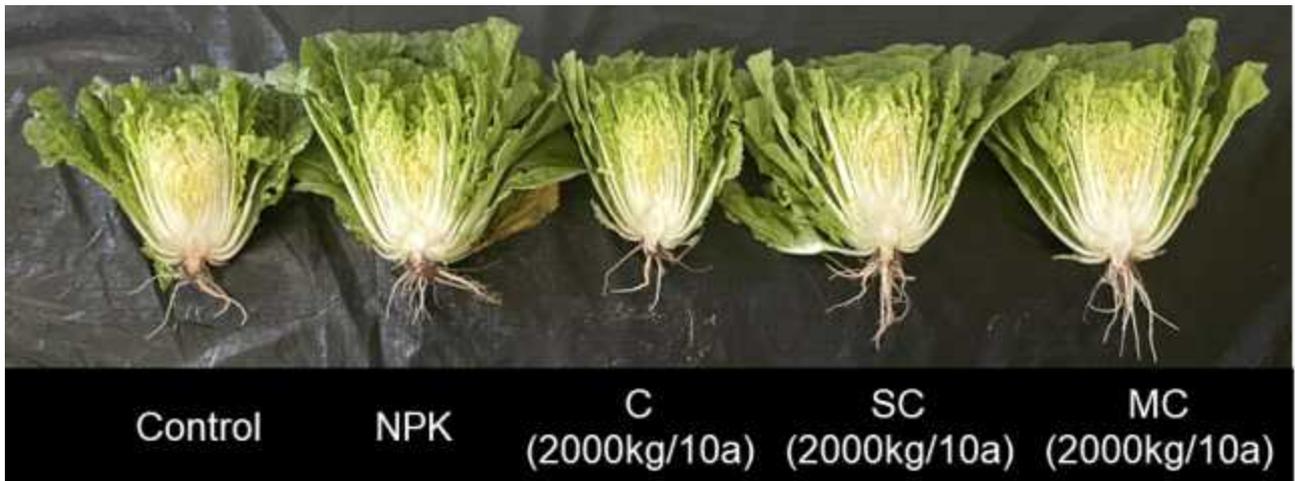


Fig. 5-21. 퇴비 종류에 따른 배추 생육 특성.

처리량 2000 kg/10a 기준으로 퇴비 종류에 따른 배추의 생육 및 수량은 Table 5-10과 같다. 엽장과 엽폭은 위의 사진과 같이 NPK가 조금 더 컸으며 엽수는 모든 처리구가 유사하였다. 생체중 총무게를 보면, NPK 처리구가 2146.7 g으로 엽장 및 엽폭의 결과와 같이 가장 무거웠으며 톱밥퇴비 2035.6 g, 바이오차 혼합깔짚퇴비 1775.1 g, 관용퇴비 1636.5 g, 무처리구 1290.1 g 순으로 나타났다. 모든 생육조사 항목에서 톱밥퇴비가 전반적으로 NPK 처리구와 유사한 결과를 나타내었다.

Table 5-10. 퇴비 종류에 따른 배추 생육 및 수량

		Control	NPK	C (2000kg/10a)	SC (2000kg/10a)	MC (2000kg/10a)
엽장	cm	28.9	36.8	31.8	34.3	32.0
엽폭		16.6	24.4	20.0	22.5	20.1
엽수	개	51.6	52.4	52.4	53.8	54.6
지상부(생체중)		1273.8	2130.0	1616.9	2012.7	1752.7
지하부(생체중)		16.3	16.7	19.7	23.0	22.4
총무게(생체중)		1290.1	2146.7	1636.5	2035.6	1775.1
지상부(건중)	g	79.3	144.8	100.6	125.2	109.1
지하부(건중)		3.5	3.6	4.2	4.9	4.8
총무게(건중)		82.7	148.4	104.8	130.1	113.8
수량		3395.9	5678.6	4310.5	5365.8	4672.7
수량지수	kg/10a	60	100	76	94	82

퇴비 처리량 2000 kg/10a 기준으로 퇴비 종류에 따른 배추의 무기성분 함량은 Table 5-11과 같다. T-N 함량은 톱밥퇴비가 1.63%로 가장 높은 수치를 나타냈으며, P₂O₅, K₂O는 톱밥퇴비와 바이오차 혼합깔짚퇴비에서 가장 높게 나타났다. CaO, MgO, Na₂O, Fe, Mn의 함량은 NPK 처리구에 비하여 모든 퇴비 처리구에서 감소하는 경향을 보였다.

Table 5-11. 퇴비 종류에 따른 수확기 배추 무기성분

		Control	NPK	C (2000kg/10a)	SC (2000kg/10a)	MC (2000kg/10a)
T-N		1.26	1.59	1.28	1.63	1.06
P ₂ O ₅		2.01	1.95	1.65	2.34	2.25
K ₂ O	%	0.35	0.40	0.31	0.43	0.46
CaO		1.84	2.46	1.82	2.30	2.29
MgO		0.39	0.60	0.33	0.54	0.49
Na ₂ O		0.09	0.28	0.17	0.21	0.20
Fe		476.52	498.59	253.77	62.94	21.62
Mn	mg/kg	65.59	133.76	70.74	79.35	64.92
B		18.93	9.66	10.90	7.54	12.31

퇴비 종류에 따른 배추 내의 중금속 함량은 모든 처리구에서 매우 낮거나 검출되지 않았으며, 상대적으로 Zn의 함량이 높았지만, 유해성이 나타날 정도의 높은 농도는 아니었다. 톱밥퇴비의 Zn 함량이 비교적 높았고 As와 Hg는 모든 처리구에서 불검출이었으며, Pb는 무처리구와 관용퇴비를 제외하고 불검출되었다. 톱밥퇴비와 바이오차 혼합깔짚퇴비의 중금속 함량은 Zn과 Cu를 제외하고 유사한 경향을 보였다. Cd 농도는 모든 퇴비 처리구가 각각 0.24, 0.27 및 0.22 mg/kg으로 각각 0.31 및 0.34 mg/kg으로 검출된 무처리구와 NPK 처리구보다 낮게 검출되었다.

Table 5-12. 퇴비 종류에 따른 수확기 배추 중금속

	Control	NPK	C (2000kg/10a)	SC (2000kg/10a)	MC (2000kg/10a)
Zn	50.49	54.02	49.24	68.68	54.70
As	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	0.31	0.34	0.24	0.27	0.22
Cr	0.27	1.46	0.73	0.64	0.78
Cu	6.15	8.07	6.85	5.71	3.10
Ni	1.86	2.35	1.41	4.94	4.75
Pb	0.38	ND	0.28	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND

NPK+C의 처리량에 따른 배추 수확량을 비교했을 때, 세 가지 퇴비 처리구 모두 NPK 처리구와 수확량이 유사하게 나타났다. 관용퇴비의 처리량이 증가됨에 따라 수확량도 함께 증가되었으며 2000 kg/10a와 4000 kg/10a을 처리한 배추의 생육이 가장 좋았다. NPK 단독 처리구와 NPK와 퇴비를 함께 처리한 처리구들이 유사한 수확량을 나타냄과 동시에 관용퇴비 1000 kg/10a을 처리한 배추의 수확량이 가장 낮았지만 무처리구보다는 1.5배 가량 높았다. 배추 수확 후 사진에서는 1000 kg/10a와 4000 kg/10a의 생육 상태가 가장 좋게 나타났다.

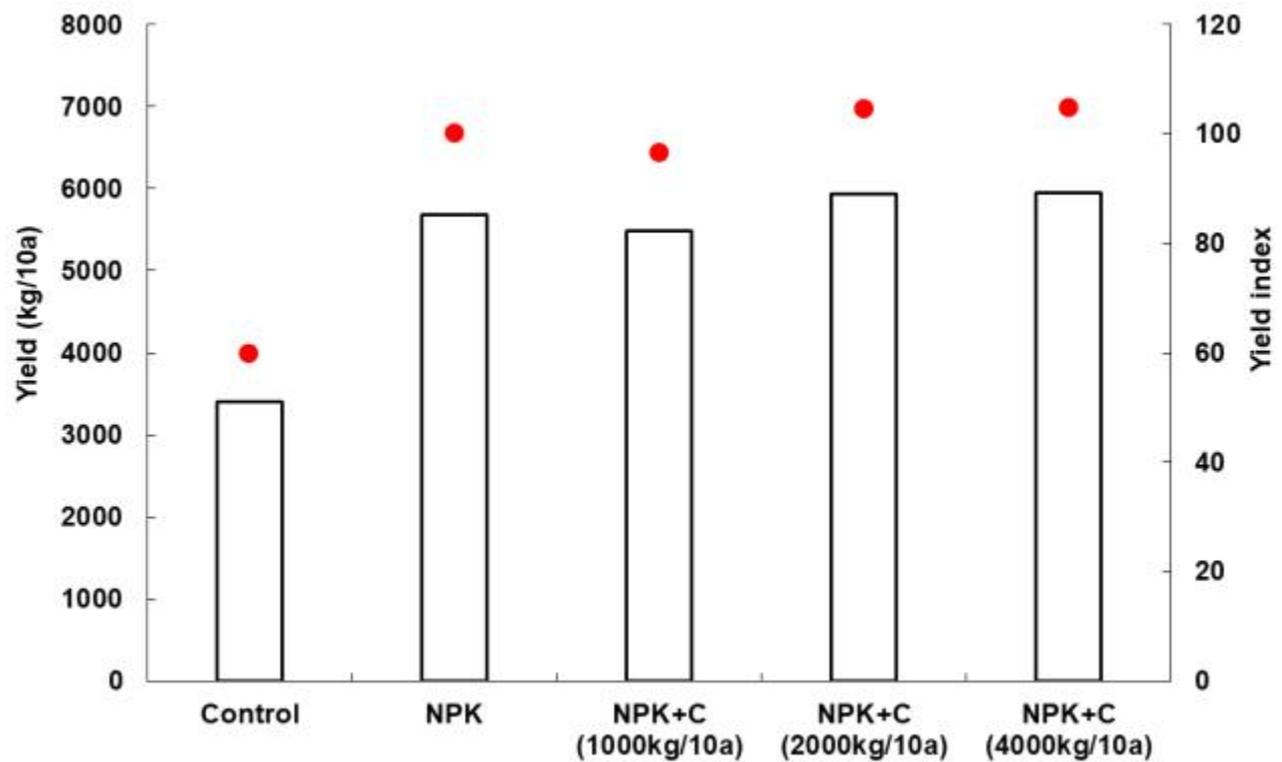
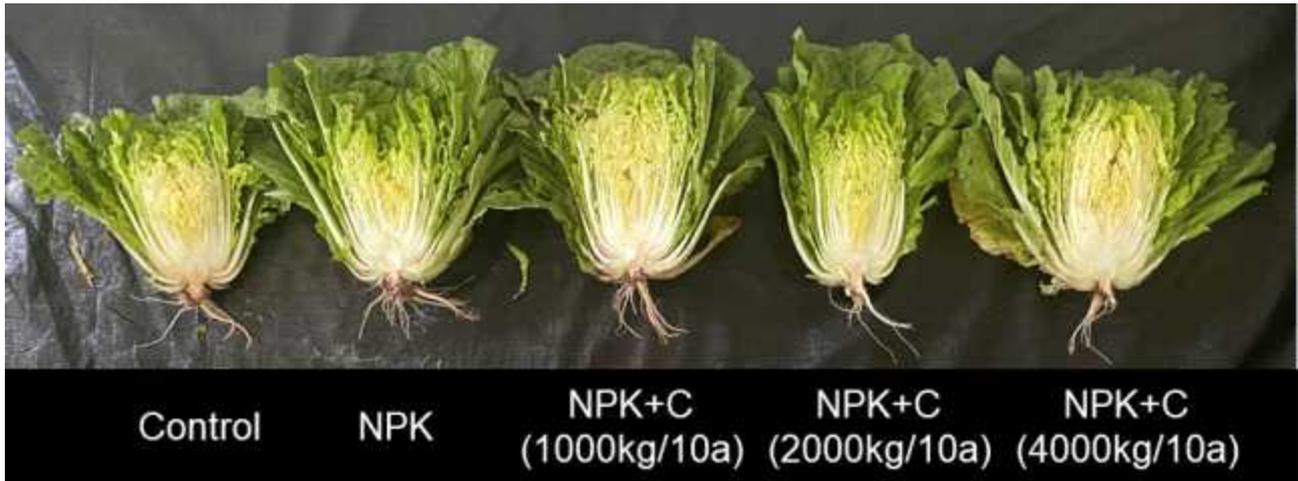


Fig. 5-22. NPK+C 처리량에 따른 배추 생육 특성.

NPK+C의 처리량에 따른 배추의 생육 및 수량은 Table 5-13과 같다. 엽장, 엽폭 및 엽수는 NPK와 NPK+퇴비 처리구가 유사하였다. 생체중 총무게는 2000 kg/10a와 4000 kg/10a 처리구가 각각 2244.9 g, 2249.9 g으로 가장 높게 나타났다. 무처리구에 비하여 NPK를 처리한 모든 처리구의 수량이 2배 가까이 증가하였다.

Table 5-13. NPK+C 처리량에 따른 배추 생육 및 수량

		Control	NPK	NPK+C (1000kg/10a)	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+C (4000kg/10a)
엽장	cm	28.9	36.8	36.5	35.8	36.8
엽폭		16.6	24.4	23.6	23.4	24.9
엽수	개	51.6	52.4	51.4	51.4	56.4
지상부(생체중)		1273.8	2130.0	2056.0	2225.6	2230.9
지하부(생체중)		16.3	16.7	18.1	19.4	19.1
총무게(생체중)		1290.1	2146.7	2074.1	2244.9	2249.9
지상부(건중)	g	79.3	144.8	127.9	126.8	138.8
지하부(건중)		3.5	3.6	3.9	4.1	4.1
총무게(건중)		82.7	148.4	131.8	131.0	142.9
수량	kg/10a	3395.9	5678.6	5481.3	5933.3	5947.5
수량지수		60	100	97	104	105

NPK+C의 처리량에 따른 배추의 무기성분 함량은 Table 5-14와 같다. NPK만 처리한 배추의 T-N 함량은 1.59%로 NPK와 퇴비를 함께 처리한 배추의 함량보다 유사하게 나타났고 2000 kg/10a를 처리한 배추의 T-N 함량이 1.66%로 가장 높았다. P₂O₅ 함량은 4000 kg/10a 처리구가 2.31%로 가장 높았으며, K₂O 함량도 동일한 결과를 나타냈다. 관용퇴비의 처리량이 증가할수록 NPK의 함량이 비례하여 증가하는 경향을 나타내지는 않았으며 NPK를 제외한 무기성분은 NPK 단독 처리구에서 더 높은 수치를 나타내거나 Mn은 관용퇴비 1000 kg/10a를 처리한 배추에서 165.17 mg/kg으로 가장 높은 농도를 보여주는 등 처리량 증가와 무기성분마다 비례하여 증가되지는 않았다.

Table 5-14. NPK+C 처리량에 따른 수확기 배추 무기성분

		Control	NPK	NPK+C (1000kg/10a)	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+C (4000kg/10a)
T-N		1.26	1.59	1.60	1.66	1.52
P ₂ O ₅		2.01	1.95	1.75	1.91	2.31
K ₂ O	%	0.34	0.42	0.38	0.39	0.49
CaO		1.84	2.41	2.16	1.81	2.36
MgO		0.39	0.60	0.47	0.40	0.57
Na ₂ O		0.09	0.28	0.19	0.30	0.48
Fe		476.52	498.59	388.20	214.13	103.93
Mn	mg/kg	65.59	133.76	165.17	51.28	101.70
B		18.93	9.66	8.73	8.31	8.43

NPK+C의 처리량에 따른 배추의 중금속 함량은 Table 5-15와 같다. 처리량에 따른 배추 내의 중금속 함량은 모든 처리구에서 매우 낮거나 검출되지 않았으며, 상대적으로 Zn의 함량이 높았지만, 유해성이 나타날 정도의 높은 농도는 아니었다. 관용퇴비 2000 kg/10a를 처리한 배추의 Zn 함량이 비교적 높았고 As와 Hg는 모든 처리구에서 불검출이었으며, Pb는 무처리구와 1000 kg/10a 처리구를 제외하고 불검출되었다.

Table 5-15. NPK+C 처리량에 따른 수확기 배추 중금속

	Control	NPK	NPK+C (1000kg/10a)	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+C (4000kg/10a)
Zn	50.49	54.02	58.58	59.19	55.61
As	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	0.31	0.34	0.26	0.37	0.35
Cr	0.27	1.46	4.20	0.55	2.14
Cu	6.15	8.07	9.93	3.78	8.01
Ni	1.86	2.35	3.34	2.74	3.21
Pb	0.38	ND	0.26	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND

NPK+SC의 처리량별 배추 수확량을 비교했을 때, NPK+톱밥퇴비를 2000 kg/10a를 처리한 배추의 수확량이 가장 높았다. 그 다음으로 4000 kg/10a, NPK, 1000 kg/10a, 무처리구 순으로 수확량이 높게 나타났다. 위의 사진에서 보는 바와 같이, 무처리구보다 그 외의 NPK 및 NPK+톱밥퇴비 처리구의 생육이 좋았다. 종합적으로, 톱밥퇴비의 처리량의 증가와 수확량이 비례하여 증가하지는 않았지만 무처리 및 NPK 단독 처리구보다 NPK+톱밥퇴비를 2000 kg/10a를 처리한 배추의 수확량 높게 나타났다.

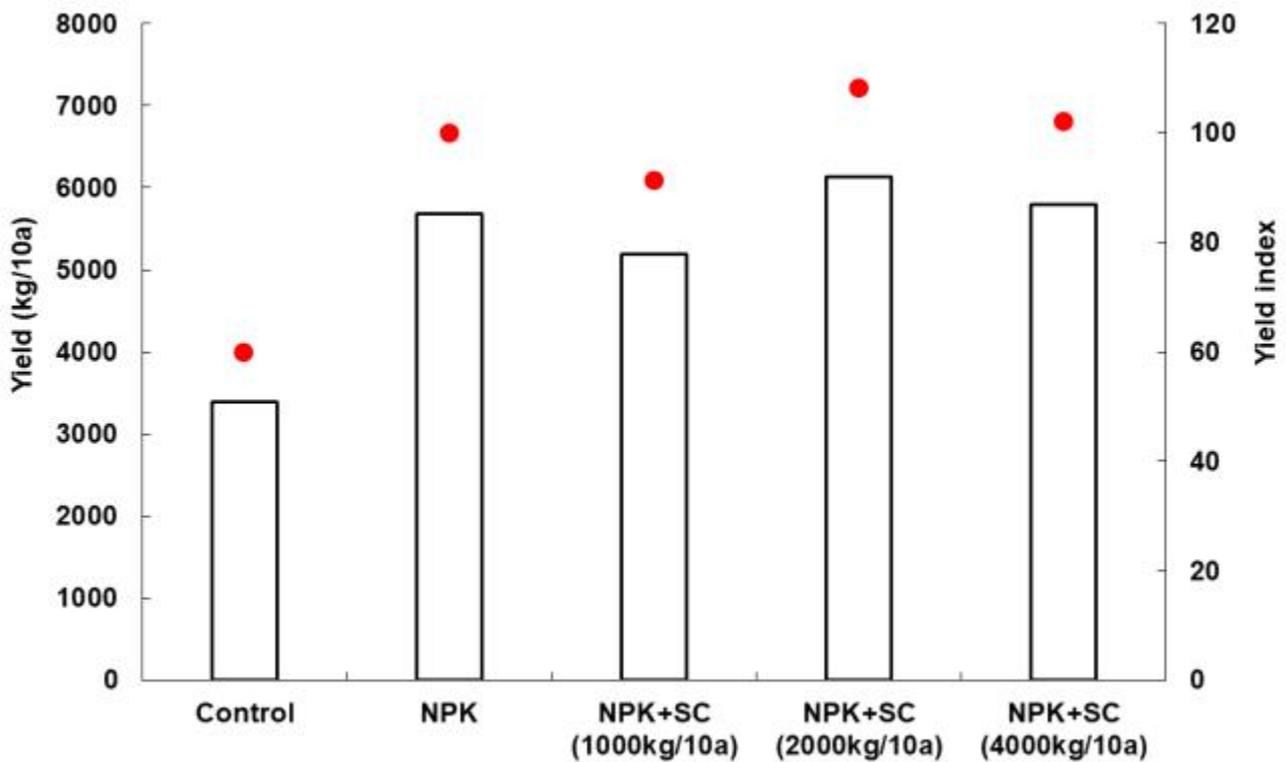
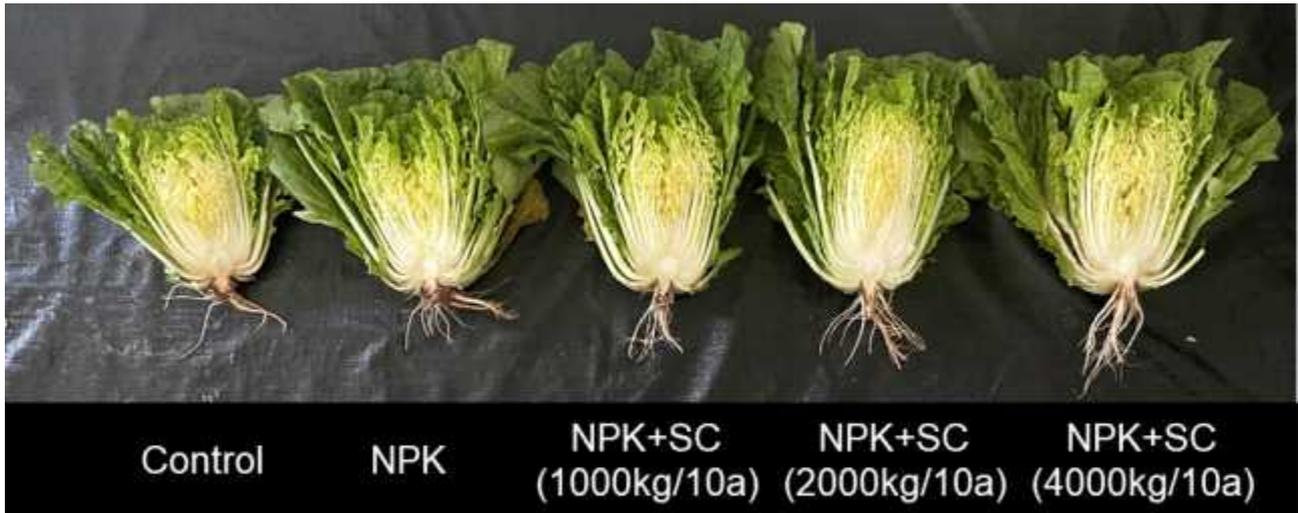


Fig. 5-23. NPK+SC의 처리량에 따른 배추 생육 특성.

NPK+SC의 처리량별 배추의 생육 및 수량은 Table 5-16과 같다. 엽장, 엽폭, 엽수 및 생체 중은 NPK+톱밥퇴비를 2000 kg/10a를 처리한 배추가 가장 높은 수치를 나타내어 수확량과 동일한 결과를 나타냈다. 엽장과 엽폭은 무처리구를 제외하고는 모두 비슷한 값을 나타냈으며 생체중과 수량의 결과를 보았을 때 1000 kg/10a를 처리한 배추의 생육이 2000 kg/10a과 4000 kg/10a를 처리한 배추에 비하여 낮게 나타났다.

Table 5-16. NPK+SC의 처리량에 따른 배추 생육 및 수량

		Control	NPK	NPK+SC (1000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+SC (4000kg/10a)
엽장	cm	28.9	36.8	36.1	37.3	36.9
엽폭		16.6	24.4	23.4	23.9	23.8
엽수		51.6	52.4	40.6	54.8	50.6
지상부(생체중)	g	1273.8	2130.0	1945.3	2301.5	2171.8
지하부(생체중)		16.3	16.7	17.1	17.0	17.7
총무게(생체중)		1290.1	2146.7	1962.5	2318.5	2189.5
지상부(건중)	g	79.3	144.8	121.0	143.2	135.1
지하부(건중)		3.5	3.6	3.6	3.6	3.8
총무게(건중)		82.7	148.4	124.7	146.8	138.9
수량	kg/10a	3395.9	5678.6	5186.3	6135.7	5790.1
수량지수		60	100	91	108	102

NPK+SC의 처리량별 배추의 무기성분 함량은 Table 5-17과 같다. NPK를 처리한 배추의 T-N 함량은 1.59%에서 NPK+톱밥퇴비 2000 kg/10a과 4000 kg/10a를 처리한 배추에서 각각 1.68%, 1.85%로 증가하였으며, P₂O₅ 함량은 NPK 처리구보다 1000 kg/10a와 4000 kg/10a를 처리한 배추에서 2.24%로 더 높게 나타났다. K₂O 함량은 모든 NPK 처리구에서 유사한 결과를 나타냈다. 종합적으로, NPK 단독 처리구와 NPK+톱밥퇴비의 무기성분 함량은 비슷하였으며 톱밥퇴비 처리량이 증가함에 따라 총질소의 함량도 함께 증가되었다.

Table 5-17. NPK+SC의 처리량에 따른 수확기 배추 무기성분

		Control	NPK	NPK+SC (1000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+SC (4000kg/10a)
T-N	%	1.26	1.59	1.21	1.68	1.85
P ₂ O ₅		2.01	1.95	2.24	1.89	2.24
K ₂ O		0.34	0.42	0.46	0.47	0.42
CaO		1.84	2.41	2.09	2.28	1.95
MgO		0.39	0.60	0.53	0.63	0.45
Na ₂ O		0.09	0.28	0.24	0.45	0.22
Fe		476.52	498.59	396.57	52.69	274.42
Mn		mg/kg	65.59	133.76	167.14	81.56
B		18.93	9.66	10.43	9.31	10.04

NPK+SC의 처리량별 배추의 중금속 함량은 Table 5-18과 같다. NPK+톱밥퇴비 처리량에 따른 배추 내의 중금속 함량은 모든 처리구에서 매우 낮거나 검출되지 않았으며, 상대적으로 Zn의 함량이 높았지만, 유해성이 나타날 정도의 높은 농도는 아니었다. 톱밥퇴비의 Zn 함량이 무처리구와 NPK 처리구에 비해 높게 검출되었고 As와 Hg는 모든 처리구에서 불검출이었으며, Pb는 무처리구를 제외하고 불검출되었다. 톱밥퇴비의 처리량이 증가할수록 모든 중금속 함량이 감소되는 경향을 보였다.

Table 5-18. NPK+SC의 처리량에 따른 수확기 배추 중금속

	Control	NPK	NPK+SC (1000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+SC (4000kg/10a)
Zn	50.49	54.02	82.23	81.55	63.06
As	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	0.31	0.34	0.38	0.30	0.13
Cr	0.27	1.46	1.20	0.45	ND
Cu	6.15	8.07	8.05	3.84	2.47
Ni	1.86	2.35	5.33	4.23	1.89
Pb	0.38	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND

NPK+MC의 처리량별 배추 수확량을 조사한 결과, NPK를 처리하였을 때보다 NPK+MC를 처리하였을 때 생육이 높았다. NPK+MC의 처리량이 4000 kg/10a로 증가함에 따라 배추의 생육도 증가하였다. 하지만 1000 kg/10a를 처리하는 NPK 처리와 유사한 수확량을 나타냈다. 배추 수확 후 사진에서 보는 바와 같이, NPK+MC의 처리구는 Control 처리구보다 생육 상태가 더 좋았다.

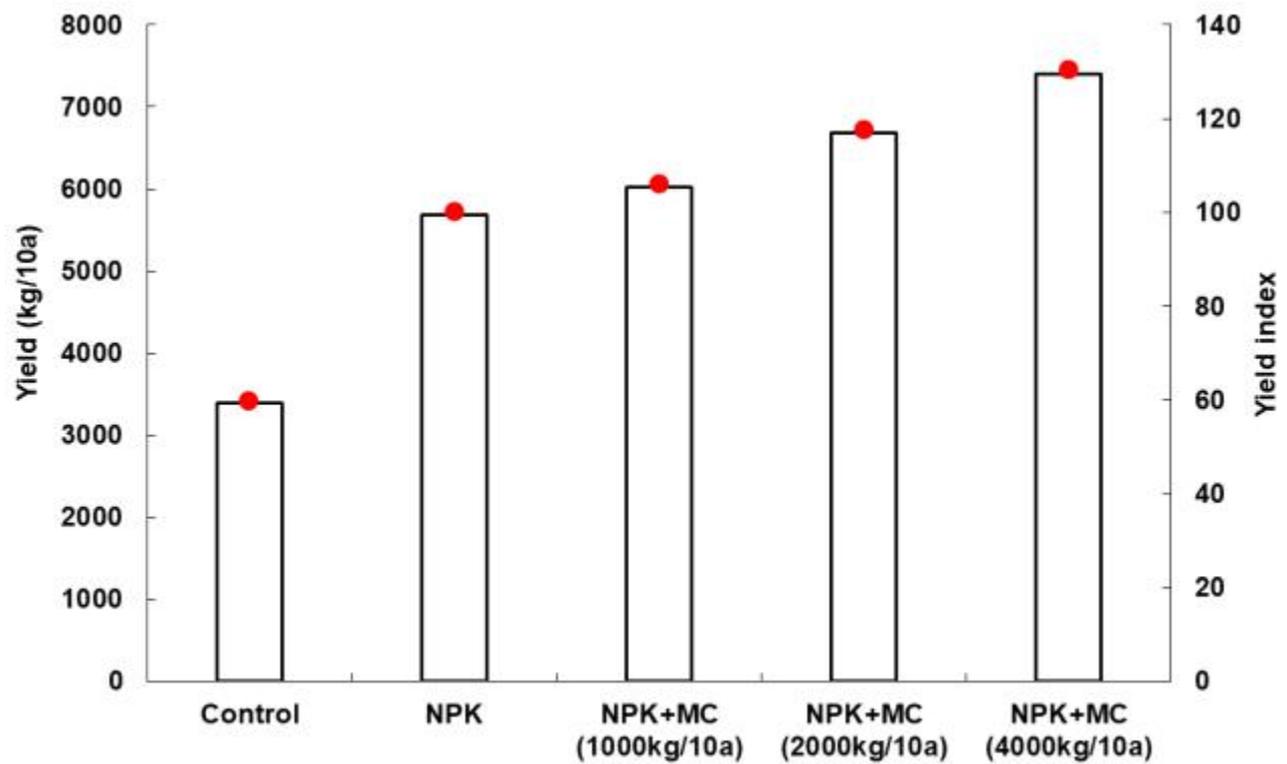
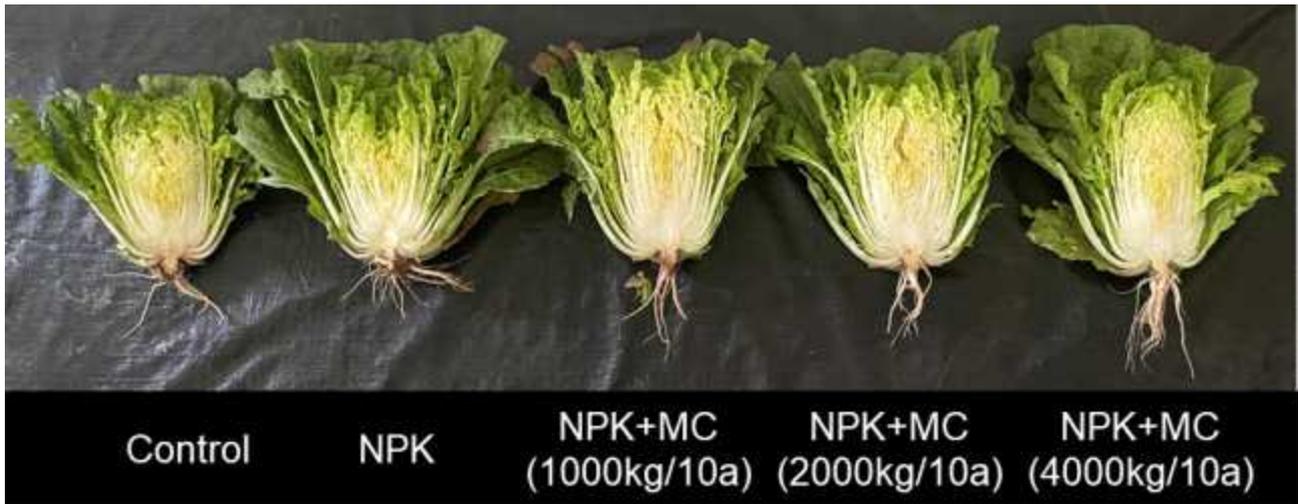


Fig. 5-24. NPK+MC의 처리량에 따른 배추 생육 특성.

NPK+MC 처리량별 배추의 생육 및 수량은 Table 5-19와 같다. 모든 처리구에서 엽장, 엽폭, 엽수는 유사하였다. NPK+MC 처리량이 증가함에 따라 배추의 생체중과 수량이 증가하였다. 특히 4000 kg/10a의 NPK+MC를 처리하였을 때 생체중, 건중, 수량, 수량지수가 모두 가장 높았으며, 작물 비료로서 NPK+MC의 활용 가능성을 보여주었다.

Table 5-19. NPK+MC의 처리량에 따른 배추 생육 및 수량

		Control	NPK	NPK+MC (1000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)	NPK+MC (4000kg/10a)
엽장	cm	28.9	36.8	36.9	34.7	38.1
엽폭		16.6	24.4	23.5	22.3	25.9
엽수		51.6	52.4	54.0	52.2	58.0
지상부(생체중)		1273.8	2130.0	2258.9	2506.7	2774.9
지하부(생체중)		16.3	16.7	19.3	18.5	21.4
총무게(생체중)		1290.1	2146.7	2278.1	2525.2	2796.3
지상부(건중)	g	79.3	144.8	140.6	126.6	172.7
지하부(건중)		3.5	3.6	4.1	3.9	4.6
총무게(건중)		82.7	148.4	144.7	130.5	177.2
수량	kg/10a	3395.9	5678.6	6022.1	6682.8	7397.9
수량지수		60	100	106	118	130

NPK+MC의 처리량별 배추의 무기성분 함량은 Table 5-20과 같다. NPK+MC의 처리량이 증가함에 따라 배추 내 P₂O₅, K₂O, Na₂O, Mn의 함량이 증가하였다. CaO, Fe, B의 함량은 4000 kg/10a에서 다소 감소하였지만, 2000 kg/10a과는 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 5-20. NPK+MC의 처리량에 따른 수확기 배추 무기성분

		Control	NPK	NPK+MC (1000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)	NPK+MC (4000kg/10a)
T-N		1.26	1.59	1.76	1.13	1.68
P ₂ O ₅		2.01	1.95	1.85	2.09	2.03
K ₂ O	%	0.34	0.42	0.39	0.41	0.42
CaO		1.84	2.41	2.00	1.93	1.85
MgO		0.39	0.60	0.55	0.46	0.49
Na ₂ O		0.09	0.28	0.25	0.25	0.42
Fe		476.52	498.59	182.08	246.92	180.31
Mn	mg/kg	65.59	133.76	106.88	109.89	122.03
B		18.93	9.66	9.13	11.67	10.07

NPK+MC의 처리량별 배추의 중금속 함량은 Table 5-21과 같다. 배추 내의 중금속 함량은 모든 처리구에서 매우 낮거나 검출되지 않았다. 다른 중금속들에 비해 상대적으로 Zn의 함량이 높았지만, 유해성이 나타날 정도의 높은 농도는 아니었다. NPK+MC의 처리량에 따른 중금속 함량은 큰 차이가 없이 유사한 경향을 보였다.

Table 5-21. NPK+MC의 처리량에 따른 수확기 배추 중금속

	Control	NPK	NPK+MC (1000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)	NPK+MC (4000kg/10a)
Zn	50.49	54.02	72.02	51.72	54.86
As	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	0.31	0.34	0.21	0.20	0.31
Cr	0.27	1.46	0.87	0.88	0.78
Cu	6.15	8.07	3.39	3.86	7.55
Ni	1.86	2.35	3.40	1.80	1.83
Pb	0.38	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND

2000 kg/10a 처리량에서 퇴비 종류에 따른 배추 생육 특성을 조사한 결과, 세 가지 퇴비 모두 무처리와 NPK 처리구보다 높은 생육을 나타냈다. 세 가지 퇴비 중 NPK+MC의 생육이 가장 높았다. 이는 배추 수확 후 사진과 동일하게 NPK+MC의 생육이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

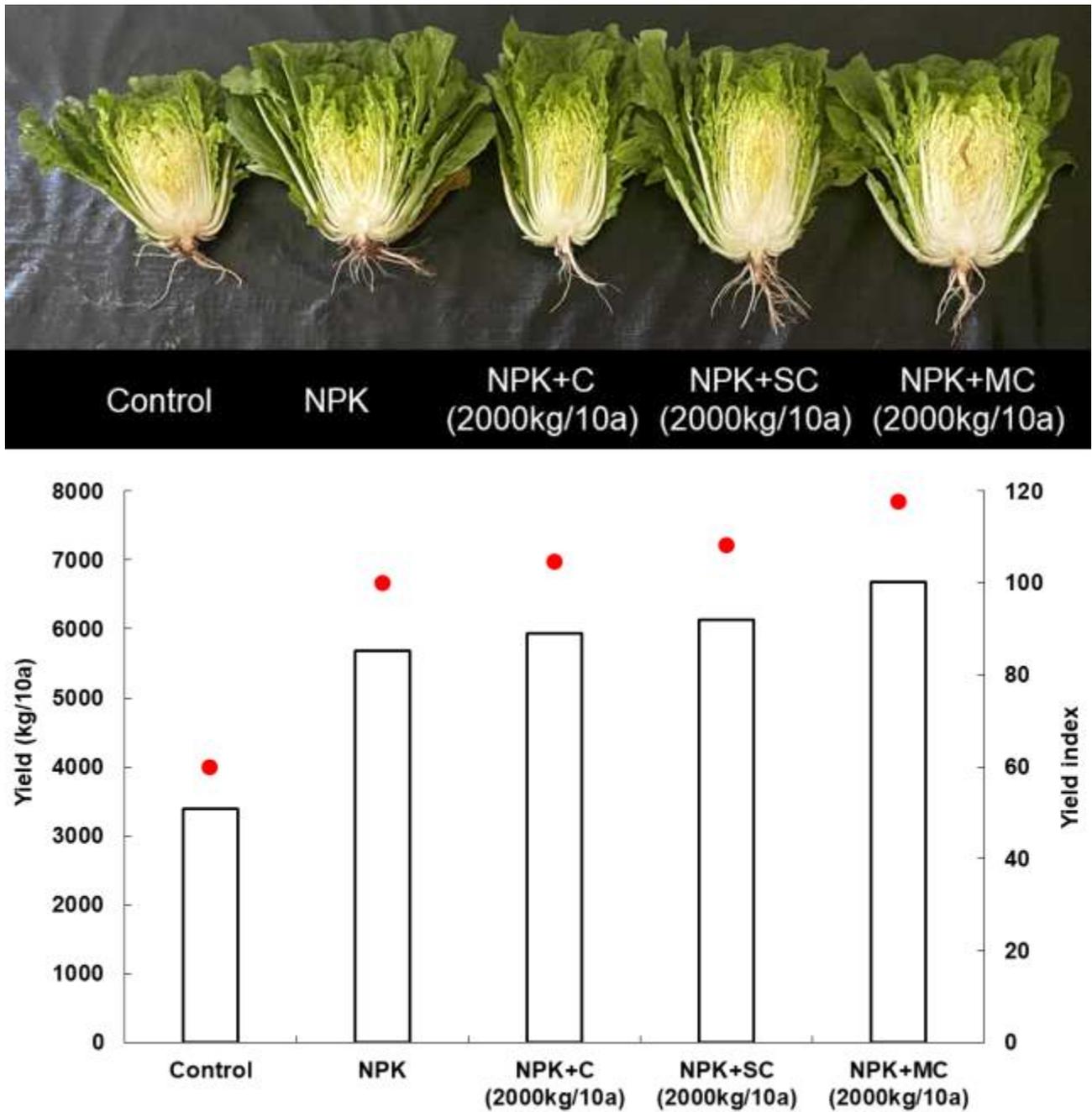


Fig. 5-25. NPK+퇴비 종류에 따른 배추 생육 특성.

2000 kg/10a 처리량 기준, NPK+C, NPK+SC, NPK+MC의 배추 생육 및 수량은 Table 5-22와 같다. 엽장, 엽폭, 엽수는 모든 처리구에서 유사하였다. 배추의 생체중과 수량은 무처리보다 퇴비 처리구에서 확연히 증가하였으며, 특히 NPK+MC를 처리하였을 때 가장 높은 생체중과 수량을 나타냈다. 따라서 NPK+MC를 사용하는 것이 배추 생육에 가장 적합한 것으로 판단된다.

Table 5-22. NPK+퇴비 종류에 따른 배추 생육 및 수량

		Control	NPK	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)
엽장	cm	28.9	36.8	35.8	37.3	34.7
엽폭		16.6	24.4	23.4	23.9	22.3
엽수	개	51.6	52.4	51.4	54.8	52.2
지상부(생체중)		1273.8	2130.0	2225.6	2301.5	2506.7
지하부(생체중)		16.3	16.7	19.4	17.0	18.5
총무게(생체중)		1290.1	2146.7	2244.9	2318.5	2525.2
지상부(건중)	g	79.3	144.8	126.8	143.2	126.6
지하부(건중)		3.5	3.6	4.1	3.6	3.9
총무게(건중)		82.7	148.4	131.0	146.8	130.5
수량	kg/10a	3395.9	5678.6	5933.3	6135.7	6682.8
수량지수		60	100	104	108	118

2000 kg/10a 처리량 기준, NPK+C, NPK+SC, NPK+MC의 배추의 무기성분 함량은 Table 5-23과 같다. NPK를 처리한 배추의 T-N 함량은 1.59%에서 NPK+관용퇴비와 NPK+톱밥퇴비에서 각각 1.66% 및 1.68%로 증가하였으며, NPK+바이오차 혼합갈짚퇴비에서 1.13%로 가장 낮게 나타났다. P₂O₅ 함량은 모든 처리구에서 약 2%로 비슷하였고, K₂O 함량도 큰 차이를 보이지 않았다. 그 외의 무기성분은 퇴비 종류에 따라 상이한 결과를 보여주었는데, MgO와 Na₂O는 NPK+톱밥퇴비를 처리한 배추에서 가장 높은 함량을 나타냈다. 종합적으로, 특정 퇴비 처리구의 무기성분 함량은 각 성분에 따라 상이한 결과를 나타냈으며 특히 T-N, K₂O, MgO 및 Na₂O에서 NPK+톱밥퇴비를 처리한 배추가 작은 차이지만 가장 높은 수치를 나타냈다.

Table 5-23. NPK+퇴비 종류에 따른 수확기 배추 무기성분

		Control	NPK	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)
T-N		1.26	1.59	1.66	1.68	1.13
P ₂ O ₅		2.01	1.95	1.91	1.89	2.09
K ₂ O	%	0.34	0.42	0.39	0.47	0.41
CaO		1.84	2.41	1.81	2.28	1.93
MgO		0.39	0.60	0.40	0.63	0.46
Na ₂ O		0.09	0.28	0.30	0.45	0.25
Fe		476.52	498.59	214.13	52.69	246.92
Mn	mg/kg	65.59	133.76	51.28	81.56	109.89
B		18.93	9.66	8.31	9.31	11.67

2000 kg/10a 처리량 기준, NPK+C, NPK+SC, NPK+MC의 배추의 중금속 함량은 Table 5-24와 같다. 퇴비 종류에 따른 배추 내의 중금속 함량은 모든 처리구에서 매우 낮거나 검출되지 않았으며, 상대적으로 Zn의 함량이 높았지만, 유해성이 나타날 정도의 높은 농도는 아니었다. 톱밥퇴비의 Zn 함량이 비교적 높았고 As와 Hg는 모든 처리구에서 불검출이었으며, Pb는 무처리구를 제외하고 불검출되었다. 톱밥퇴비의 Zn 함량이 다른 톱밥 처리구에 비해 높은 경향을 보였으며 바이오차 혼합갈짚퇴비의 Zn, Cd과 Ni의 농도가 비교적 낮게 검출되었다.

Table 5-24. NPK+퇴비 종류에 따른 수확기 배추 중금속

	Control	NPK	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)
Zn	50.49	54.02	59.19	81.55	51.72
As	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	0.31	0.34	0.37	0.30	0.20
Cr	0.27	1.46	0.55	0.45	0.88
Cu	6.15	8.07	3.78	3.84	3.86
Ni	1.86	2.35	2.74	4.23	1.80
Pb	0.38	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND

② 토양 특성 변화

퇴비 시용에 따른 토양의 화학성을 분석한 결과, NPK를 처리하였을 때보다 퇴비를 시용하였을 때 P₂O₅, K, Ca, Na와 같은 다량원소가 증가하였고, 토양 내 질소 함량이 증가하였다. 토양 내 중금속 함량은 모든 처리구에서 매우 낮거나 검출되지 않았다. Zn과 Cr의 함량은 다른 중금속들에 비해 상대적으로 높았지만, 유해성이 나타날 정도의 높은 농도는 아니었다.

Table 5-25. 퇴비 시용에 따른 배추 수확기 토양 화학적 특성

	Control	NPK	C (2000kg/10a)	SC (2000kg/10a)	MC (2000kg/10a)	
pH	(1:5)	6.9	6.6	7.2	7.1	7.2
EC	dS/m	0.3	1.6	1.3	2.6	1.0
O.M	%	1.0	0.9	1.5	2.3	1.8
P ₂ O ₅	mg/kg	1334.5	1275.6	1236.6	2025.4	1211.8
K		549.8	487.9	556.3	554.0	500.8
Ca		1981.4	1804.2	1826.0	2116.3	1969.1
Mg	cmol _c /kg	1763.3	2075.8	1628.4	2321.7	2256.6
Na		218.8	204.2	280.2	312.7	283.6
T-N	%	0.04	0.06	0.08	0.09	0.06
NH ₄ -N		5.25	5.25	5.25	5.25	6.42
NO ₃ -N		3.50	9.33	7.00	12.83	4.67
Fe	mg/kg	6673.1	4719.9	5422.0	8127.2	6371.5
Mn		219.8	211.9	205.5	269.9	229.1
B		21.6	18.8	18.3	23.4	22.1

Table 5-26. 퇴비 시용에 따른 토양 중금속 함량

	Control	NPK	C (2000kg/10a)	SC (2000kg/10a)	MC (2000kg/10a)
Zn	33.9	31.7	34.6	40.4	38.0
As	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd	0.6	0.5	0.5	1.1	0.6
Cr	16.2	19.7	15.6	38.7	17.5
Cu	2.5	4.3	1.9	2.1	4.2
Ni	4.2	3.8	3.5	4.6	4.8
Pb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

관용퇴비 처리량에 따른 토양 화학성을 조사한 결과, NPK를 처리하였을 때보다 관용퇴비를 처리하였을 때 토양 내 유기물, P, K, Ca, Na, N의 함량이 증가하였다. 특히 질소의 함량은 관용퇴비 처리량이 증가할수록 증가하였다. 관용퇴비 처리량에 따른 중금속 함량은 처리구에 따라 변화없이 거의 유사한 특성을 보였다. 따라서 관용퇴비의 처리량이 증가하더라도 토양의 유해성분 함량에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

Table 5-27. 관용퇴비 시용량에 따른 배추 수확기 토양 화학적 특성

	Control	NPK	NPK+C (1000kg/10a)	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+C (4000kg/10a)
pH (1:5)	6.9	6.6	6.3	6.7	6.6
EC dS/m	0.3	1.6	3.9	1.8	2.6
O.M %	1.0	0.9	3.3	2.4	2.6
P ₂ O ₅ mg/kg	1334.5	1275.6	2139.2	1403.7	1861.4
K	549.8	487.9	567.8	562.0	560.1
Ca cmol _c /kg	1981.4	1804.2	2056.2	1857.5	2245.8
Mg	1763.3	2075.8	2172.1	2450.5	1878.0
Na	218.8	204.2	266.3	305.9	406.8
T-N %	0.04	0.06	0.08	0.07	0.09
NH ₄ -N	5.25	5.25	23.92	13.42	44.92
NO ₃ -N	3.50	9.33	103.83	40.83	77.00
Fe mg/kg	6673.1	4719.9	6626.7	7774.5	5357.1
Mn	219.8	211.9	244.2	354.9	238.9
B	21.6	18.8	22.3	26.5	21.2

Table 5-28. 관용퇴비 시용량에 따른 토양 중금속 함량

	Control	NPK	NPK+C (1000kg/10a)	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+C (4000kg/10a)
Zn	33.9	31.7	39.1	59.3	32.4
As	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd	0.6	0.5	0.6	0.9	0.5
Cr	16.2	19.7	20.1	24.6	13.5
Cu	2.5	4.3	2.4	3.3	3.4
Ni	4.2	3.8	4.6	6.5	3.2
Pb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

톱밥퇴비 처리량에 따른 토양 화학성을 조사한 결과, NPK를 처리하였을 때보다 톱밥퇴비를 처리하였을 때 토양 내 질소의 함량이 크게 증가하였다. 또한 톱밥퇴비 처리량이 증가할수록 유기물, Ca, Na가 증가하였으며, 이외의 성분들은 모든 처리구에서 차이가 없이 유사하였다. 톱밥퇴비의 처리량에 따른 중금속 함량을 분석한 결과, As, Pb, Hg는 검출되지 않았으며, 그 외의 중금속 함량은 모든 처리구에서 매우 낮거나 검출되지 않았다.

Table 5-29. 톱밥퇴비 시용량에 따른 배추 수확기 토양 화학적 특성

		Control	NPK	NPK+SC (1000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+SC (4000kg/10a)
pH	(1:5)	6.9	6.6	6.4	6.2	6.6
EC	dS/m	0.3	1.6	1.9	1.3	1.0
O.M	%	1.0	0.9	0.7	0.8	2.0
P ₂ O ₅	mg/kg	1334.5	1275.6	800.4	1357.7	1494.2
K		549.8	487.9	531.4	514.8	532.8
Ca	cmol _c /kg	1981.4	1804.2	1406.5	1583.8	2073.6
Mg		1763.3	2075.8	1925.0	1953.0	1872.3
Na		218.8	204.2	202.0	273.3	322.4
T-N	%	0.04	0.06	0.04	0.06	0.09
NH ₄ -N		5.25	5.25	21.58	25.08	23.92
NO ₃ -N		3.50	9.33	59.50	112.00	192.50
Fe	mg/kg	6673.1	4719.9	6389.1	6449.8	5516.6
Mn		219.8	211.9	265.4	327.8	221.7
B		21.6	18.8	21.5	24.3	19.4

Table 5-30. 톱밥퇴비 시용량에 따른 토양 중금속 함량

		Control	NPK	NPK+SC (1000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+SC (4000kg/10a)
Zn		33.9	31.7	38.3	47.5	30.5
As		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd		0.6	0.5	0.7	0.9	0.5
Cr	mg/kg	16.2	19.7	15.8	20.7	15.3
Cu		2.5	4.3	1.7	2.5	1.9
Ni		4.2	3.8	4.1	6.2	3.7
Pb		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hg		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

바이오차 혼합깔짚 퇴비 처리량에 따른 토양 화학성을 조사한 결과, 바이오차 혼합깔짚의 처리량이 증가함에 따라 토양 내 질소함량이 증가하였다. 또한 바이오차 혼합깔짚 퇴비 처리량에 따른 토양 중금속 함량을 조사한 결과, Zn과 Cr이 미량 검출되었지만 control을 포함한 모든 처리구에서 차이가 없이 유사하였다.

Table 5-31. 혼합퇴비 시용량에 따른 배추 수확기 토양 화학적 특성

		Control	NPK	NPK+MC (1000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)	NPK+MC (4000kg/10a)
pH	(1:5)	6.9	6.6	6.1	7.1	6.4
EC	dS/m	0.3	1.6	3.6	2.0	0.6
O.M	%	1.0	0.9	0.9	2.1	1.7
P ₂ O ₅	mg/kg	1334.5	1275.6	1383.4	1080.8	1951.6
K		549.8	487.9	518.2	539.8	559.3
Ca	cmol _c /kg	1981.4	1804.2	1841.9	1386.4	1708.4
Mg		1763.3	2075.8	1959.9	1701.0	1578.8
Na		218.8	204.2	256.1	143.0	310.7
T-N	%	0.04	0.06	0.04	0.09	0.10
NH ₄ -N		5.25	5.25	53.08	28.58	65.92
NO ₃ -N		3.50	9.33	95.67	71.17	68.83
Fe	mg/kg	6673.1	4719.9	5704.8	5791.0	4291.0
Mn		219.8	211.9	200.8	226.4	144.6
B		21.6	18.8	19.5	18.4	17.4

Table 5-32. 혼합퇴비 시용량에 따른 토양 중금속 함량

		Control	NPK	NPK+MC (1000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)	NPK+MC (4000kg/10a)
Zn		33.9	31.7	31.9	32.0	21.4
As		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd		0.6	0.5	0.6	0.6	0.4
Cr	mg/kg	16.2	19.7	16.3	17.2	11.9
Cu		2.5	4.3	1.8	1.6	1.9
Ni		4.2	3.8	3.9	3.4	2.5
Pb		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hg		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

NPK 및 퇴비의 혼합 처리에 따른 토양 화학성을 조사한 결과, NPK를 단독 처리하였을 때 보다 NPK와 톱밥을 혼합 처리하였을 때 토양 내 질소의 함량이 크게 증가하였다. 바이오차 혼합갈짚 퇴비 처리량에 따른 토양 중금속 함량을 조사한 결과, 혼합처리는 토양 중금속 함량에 큰 영향을 미치지 않았다.

Table 5-33. NPK와 퇴비 혼합처리에 따른 배추 수확기 토양 화학적 특성

		Control	NPK	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)
pH	(1:5)	6.9	6.6	6.7	6.2	7.1
EC	dS/m	0.3	1.6	1.8	1.3	2.0
O.M	%	1.0	0.9	2.4	0.8	2.1
P ₂ O ₅	mg/kg	1334.5	1275.6	1403.7	1357.7	1080.8
K		549.8	487.9	562.0	514.8	539.8
Ca	cmol _c /kg	1981.4	1804.2	1857.5	1583.8	1386.4
Mg		1763.3	2075.8	2450.5	1953.0	1701.0
Na		218.8	204.2	305.9	273.3	143.0
T-N	%	0.04	0.06	0.07	0.06	0.09
NH ₄ -N		5.25	5.25	13.42	25.08	28.58
NO ₃ -N		3.50	9.33	40.83	112.00	71.17
Fe	mg/kg	6673.1	4719.9	7774.5	6449.8	5791.0
Mn		219.8	211.9	354.9	327.8	226.4
B		21.6	18.8	26.5	24.3	18.4

Table 5-34. NPK와 퇴비 혼합처리에 따른 토양 중금속 함량

		Control	NPK	NPK+C (2000kg/10a)	NPK+SC (2000kg/10a)	NPK+MC (2000kg/10a)
Zn		33.9	31.7	59.3	47.5	32.0
As		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd		0.6	0.5	0.9	0.9	0.6
Cr	mg/kg	16.2	19.7	24.6	20.7	17.2
Cu		2.5	4.3	3.3	2.5	1.6
Ni		4.2	3.8	6.5	6.2	3.4
Pb		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hg		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

③ 온실가스 발생량

깎짚 종류에 따른 배추재배지로부터 배출되는 온실가스 배출특성은 Fig. 5-26에서 보는 것과 같다. 무처리 토양에 비해 관용퇴비, 톱밥퇴비 및 바이오차 혼합깎짚퇴비 처리 시 CH₄의 발생량이 증가되는 결과를 보였으며, 특히 배추 정식 17일 및 35일 후 CH₄가 대량 발생하는 경향을 보였다. CO₂ 발생량은 모든 처리구에서 큰 차이가 나타나지 않고 유사한 경향을 보였고, 배추 정식 4일, 14일, 21일 및 35일 후에 대량 발생하였다. N₂O는 관용퇴비를 사용한 경우 다른 처리구에 비해 발생량이 현저하게 높게 나타났으며, 배추 정식 4일, 14일, 21일 및 31일 후에 N₂O가 대량 발생되었다. 전반적으로 CO₂와 N₂O는 대량 발생하는 구간이 유사하게 나타났으며, CH₄는 이와 다른 경향을 보였다. 바이오차 혼합깎짚퇴비를 사용할 경우 관용퇴비를 사용하였을 때보다 CO₂ 및 N₂O 발생량이 적었다. 따라서 바이오차 혼합깎짚퇴비가 관용퇴비를 대체하게 된다면 농경지에서 발생하는 온실가스 저감에 도움이 될 것으로 판단된다.

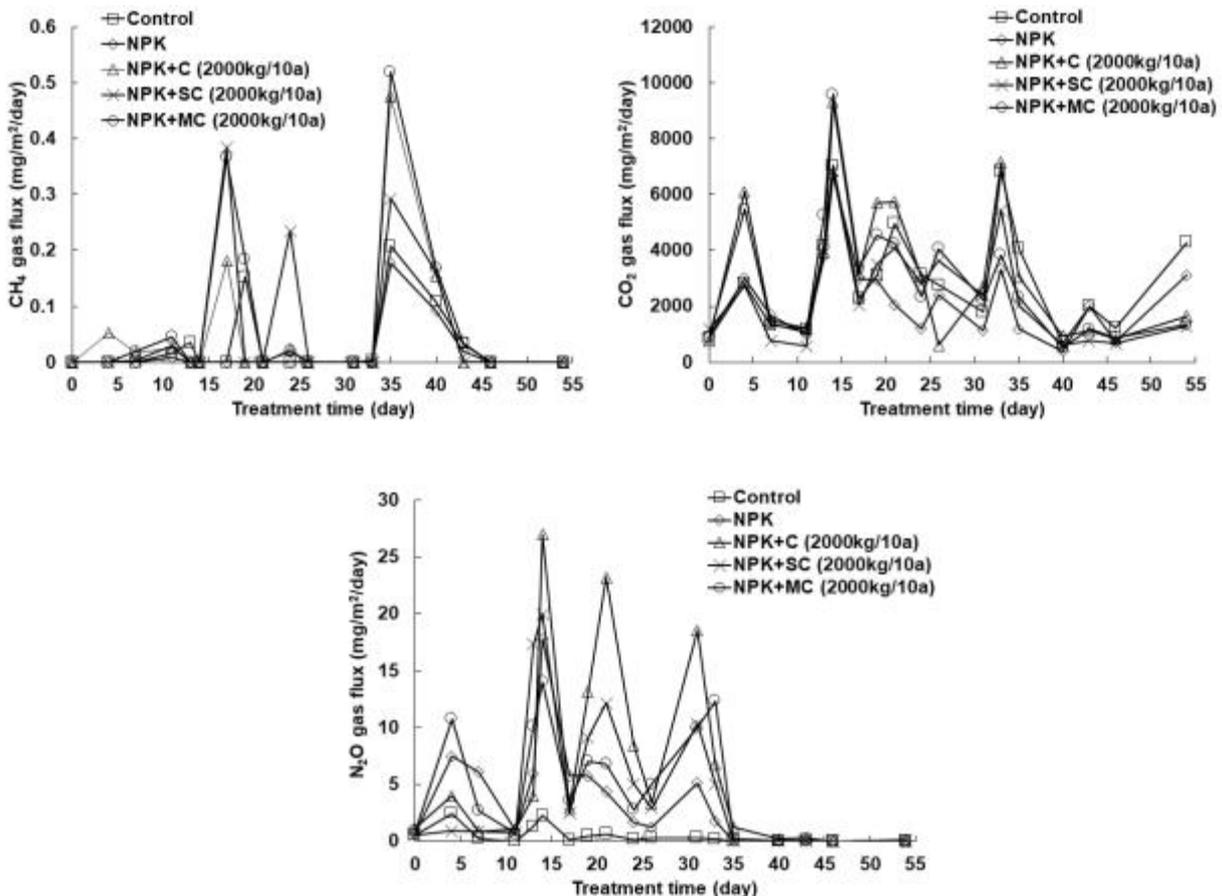


Fig. 5-26. 깎짚 종류에 따른 배추재배지로부터 배출되는 온실가스 배출특성.

④ 토양 내 미생물상 변화

개발된 바이오차 혼합깎짚퇴비의 사용에 따른 미생물 군집 분포 변화는 Fig. 5-27에서 보는 바와 같다. 무처리 토양에서는 Proteobacteria, Acidobacteria, Chloroflexi, Actinobacteria 및 Cyanobacteria가 각각 32, 27, 10, 7 및 5%로 우점적으로 분포되어 있었다. 바이오차 혼합깎짚퇴비 사용한 토양의 미생물 군집 분포는 Proteobacteria의 분포가 48%로 증가하였고, Acidobacteria의 분포가 17%로 감소되었다. 또한 Bacteroidetes 및 Germmatimonadetes의 분포가 각각 14% 및 8%으로 크게 증가되어 우점종이 되었다. Actinobacteria 및 Cyanobacteria의 분포는 무처리 토양에 비해 감소되었다.

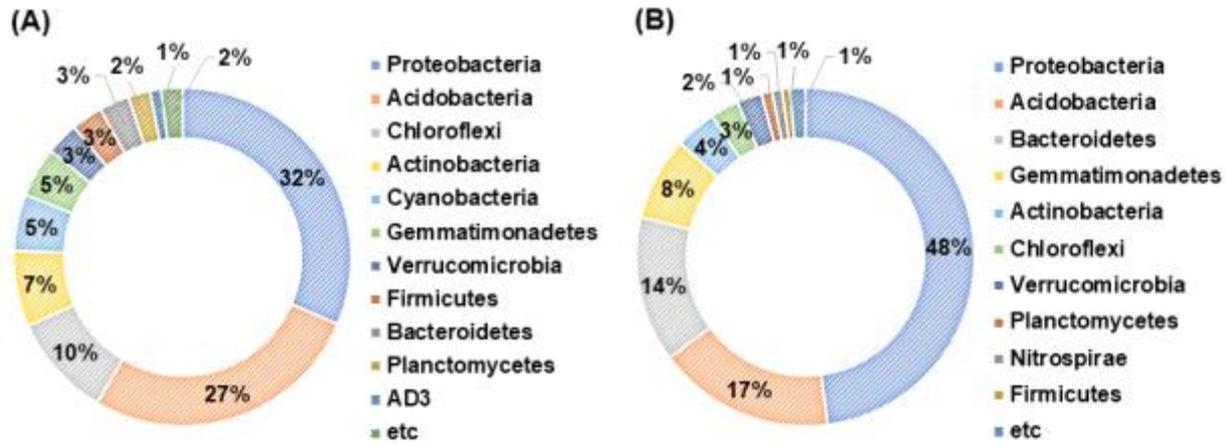


Fig. 5-27. 배추재배지에서 바이오차 혼합갈짚퇴비 시용에 따른 미생물 군집 분포 변화 [(A) Control, (B) NPK+MC(2000kg/10a)].

(나) 양분 결핍토양에서 작물 재배시험

① 재배된 작물수량 및 무기성분 조사

개발된 MC의 처리조건에 따른 콩의 생육특성은 Fig. 5-28 및 5-29에서 보는 것과 같다. MC 처리구에서 생육된 콩은 처리시일이 증가함에 따라 생육이 왕성하였으며, 이는 처리량에 의존적인 결과를 보였다. 특히 MC 처리구에서 생육된 콩의 초장은 NPK 처리와 유사한 경향으로, 이는 토양 내에 MC 처리만으로도 양분공급효과가 뛰어나다는 것을 알 수 있었다. 처리 조건별 콩의 생육전경은 Fig. 27에서 보는 것과 같다. 무처리구에 비해 NPK처리구에서 콩의 생육은 증가하였고, 왕겨퇴비구나 개발된 MC 처리구 또한 무처리구에 비해 콩의 생육은 향상되었다. MC100처리구에서 생육된 콩은 NPK 처리와 비교적 유사한 생육을 보였으나, MC의 처리량이 증가하고 무기질비료와 개발된 퇴비를 혼용시비한 처리구는 NPK 처리구에 비해 훨씬 우수한 생육을 보였다. 비교적 토양 내에 양분이 부족한 상황임에도 불구하고, 적은 MC 처리만으로 콩의 생육이 왕성한 것은 콩 자체가 양분 요구도가 낮기 때문인 것으로 판단된다.



Fig. 5-28. 처리시일에 따른 콩의 생육전경



Fig. 5-29. 처리조건별 콩의 생육전경

개발된 MC 처리조건에 따른 콩의 생육특성은 Table 5-35에서 보는 것과 같다. 무처리구에서 재배된 콩의 생중량은 129.8 g이었던 반면에 왕겨퇴비, NPK 및 개발된 MC 처리구에서 생육된 콩은 213.6, 162.5 및 125.5 g으로 처리된 퇴비 및 무기질 비료 모두 콩의 중량이 증가하는 결과를 보였다. 특히 퇴비시용구가 NPK 처리구에 비해 높은 생육특성을 보였는데, 이는 콩 자체가 양분에 의존보다는 유기물이나 토양개량효과에 더 큰 영향을 받았기 때문으로 판단된다. 개발된 MC의 처리량이 증가함에 따라 콩의 지상부 및 지하부의 생육은 전반적으로 증가하는 경향이었으며, 개발된 MC에 무기질 비료를 혼용시비할 시 콩의 생육은 더욱 향상된 결과를 보였다.

Table 5-35. 개발된 MC 처리조건에 따른 메주콩의 생육특성

처리구	상부-식물체					하부-뿌리		
	생중량 (g)	건중량 (g)	꼬투리수 (No)	잎수 (No)	초장 (cm)	생중량 (g)	건중량 (g)	근장 (cm)
무처리	129.8	34.5	89.00	110.7	73.1	8.0	4.13	28.03
대조구 (왕겨)	213.6	62.5	115.33	114.7	76.7	12.2	5.17	22.07
NPK	162.5	46.1	107.33	110.7	85.5	13.4	5.63	26.60
깔짚-C100	236.5	73.9	131.00	127.7	88.5	19.4	8.60	26.40
깔짚-C200	168.4	45.1	83.67	104.0	84.3	17.5	6.37	32.43
깔짚-C400	224.7	72.1	118.00	122.2	99.6	17.1	8.30	23.87
N+깔짚-C100	182.1	53.3	88.67	106.1	91.4	12.6	5.67	26.47
N+깔짚-C200	291.9	81.5	126.67	121.2	91.7	21.2	9.07	47.80
N+깔짚-C400	306.0	89.4	129.67	151.7	96.8	28.8	12.47	41.73

개발된 MC 처리조건에 따른 콩의 지상부 및 지하수 무기성분 함량은 Table 5-36 및 5-37에서 보는 것과 같다. 개발된 MC, NPK 및 왕겨 퇴비가 시용됨에 지상부 및 지하부의 질소 함량은 증가하는 경향이었으며, 개발된 MC 처리량에 의존적으로 증가하는 경향이였다. 그 외에 나머지 무기성분들은 처리구마다 약간씩 차이가 있기는 하였으나 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 처리조건별 무기성분 함량은 별 차이 없었으나 생체중량이 크게 차이가 있어 개발된 MC의 단독 및 혼용 처리는 토양으로부터 작물로 양분이 이행되는데 효과적인 것으로 판단된다. 이상의 결과를 미루어볼 때, 개발된 MC 퇴비는 양분이 결핍된 토양에 콩 재배시 효과적인 제재로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5-36. 콩 지하부 무기성분 함량

처리내용	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	Fe	Mn	Cu	Zn
	----- % -----						----- mg/kg -----			
무처리	0.292	0.123	0.729	0.252	0.219	0.016	461.5	26.992	10.2	20.2
대조구 (왕겨)	0.300	0.130	0.737	0.267	0.227	0.035	306.5	30.242	8.4	18.4
NPK	0.379	0.142	0.857	0.280	0.240	0.900	416.5	32.242	7.8	16.6
깔짚-C100	0.324	0.073	0.917	0.198	0.174	0.056	311.5	73.242	6.9	15.2
깔짚-C200	0.397	0.073	0.917	0.395	0.179	0.015	436.5	72.992	11.2	14.8
깔짚-C400	0.427	0.067	0.902	0.187	0.173	0.019	419.2	73.492	8.9	16.9
N+깔짚-C100	0.392	0.092	0.842	0.210	0.190	0.030	389.1	47.742	10.6	20.2
N+깔짚-C200	0.489	0.111	0.877	0.232	0.213	0.031	315.4	52.992	11.6	18.2
N+깔짚-C400	0.584	0.117	0.877	0.240	0.198	0.025	496.5	55.242	8.9	15.2

Table 5-37. 콩 지상부 무기성분 함량

처리내용	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O				
							----- % -----			----- mg/kg -----
무처리	1.394	0.18	1.5	1.1	0.345	0.051	21.8	103.2	2.68	8.16
대조구 (왕겨)	1.184	0.17	1.5	1.1	0.335	0.029	19.8	102.7	4.62	9.14
NPK	1.259	0.17	1.4	1.0	0.333	0.006	17.8	99.7	3.26	5.64
갈짚-C100	1.709	0.16	1.8	0.8	0.368	0.018	22.3	240.2	4.15	8.62
갈짚-C200	1.665	0.15	1.7	0.8	0.365	0.038	26.8	226.4	3.66	7.95
갈짚-C400	2.357	0.12	1.8	0.9	0.365	0.070	33.5	228.9	8.21	6.62
N+갈짚-C100	2.234	0.12	1.7	0.7	0.348	0.170	73.6	155.4	6.25	8.49
N+갈짚-C200	2.024	0.13	1.7	0.7	0.355	0.026	80.1	163.7	4.16	7.95
N+갈짚-C400	2.184	0.14	1.8	0.9	0.365	0.011	80.2	159.2	5.64	6.61

② 토양 특성 변화

개발된 MC 처리조건별 콩 재배지의 토양 화학성 변화는 Table 5-38에서 보는 것과 같다. MC 처리조건별 토양의 pH 및 EC는 5.12-5.88 및 0.04-0.18 dS/m의 범위로 처리조건별 약간씩 차이는 있었으나, 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 특히 개발된 MC가 포함된 처리구에서 pH가 약간 증가하기는 하였는데, 이는 MC 내에 포함된 biochar의 영향으로 판단된다. 특히, MC가 처리된 토양 내에 유기물의 함량은 무처리구나 NPK처리구에 비해 급격히 증가한 결과를 보였으며, 이는 MC 처리량이 증가함에 따라 증가하는 경향이었다. 이러한 결과는 개발된 MC가 토양 내에 양분을 공급하기에 충분한 소재인 것으로 판단되며, 토양에 연속하여 MC를 처리할 시 장기적으로 토양유기물을 증진할 수 있는 방안으로 판단된다.

Table 5-38. 개발된 MC 처리조건별 콩 재배지 토양의 화학성 변화

처리조건	pH	EC	OM	T-N	P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn
	1:5	dS/m	--g/kg--	mg/kg	mg/kg	-----	cmol _c /kg	-----	-----	--mg/kg--	--mg/kg--
무처리	5.12	0.04	1.33	0.22	29.2	0.80	1.42	0.51	0.05	21245	925
대조구 (왕겨)	5.49	0.06	4.12	0.47	31.2	1.02	1.25	0.61	0.12	22154	934
NPK	5.31	0.18	1.67	0.76	42.7	0.98	1.31	0.42	0.04	21695	921
갈짚-C100	5.46	0.12	2.62	0.32	38.6	1.25	1.48	0.48	0.11	22165	916
갈짚-C200	5.55	0.16	4.16	0.49	40.1	1.45	1.26	0.51	0.18	24152	944
갈짚-C400	5.61	0.15	6.16	0.59	45.9	1.51	1.31	0.54	0.24	22145	964
N+갈짚-C100	5.49	0.18	3.69	0.44	38.4	1.02	1.22	0.60	0.16	23125	947
N+갈짚-C200	5.88	0.16	6.25	0.67	51.9	1.14	1.69	0.58	0.18	21542	955
N+갈짚-C400	5.64	0.18	8.16	0.68	61.2	1.36	1.48	0.61	0.24	21641	915

③ 온실가스 발생량

개발된 MC 처리에 따른 콩재배지로부터 배출되는 온실가스 배출특성은 Fig. 5-28에서 보는 것과 같다. 무처리 토양에 비해 일반퇴비 (C), 개발된 퇴비 및 NPK 처리 시 온실가스 배출량은 현저하게 높은 결과를 보였다. 특히, 일반퇴비에서 가장 높은 온실가스 배출량을 보였는데, 이는 토양내 미생물에 의해 유기물이 분해되었기 때문으로 판단된다. 반면에 개발된 MC 처리구의 경우 온실가스 배출량은 일반퇴비에 비해 낮았다. 이러한 결과는 일반퇴비에는 왕겨가 포함된 반면에 개발된 MC에는 바이오차가 주원료로 구성되어 온실가스 배출량이 감소한 것으로 판단된다. MC의 주원료인 바이오차는 이미 열분해 과정을 통하여 장기간 토양 생물학적 반응에서도 분해될수 없는 탄소의 구조로 형태로 되어 있기 때문에 비교적 안정한 상태로 존재할 수 있다. 이에 따라 MC에서 배출된 온실가스 배출량은 가축분의 분해가 주요 반응대상이라면 일반퇴비는 수분조절제로 이용된 목질계 바이오매스와 가축분 모두 온실가스 배출에 기여하기 때문에 일반퇴비가 MC에 비해 높은 온실가스 배출량을 보인 것으로 판단된다. 토양에서 N₂O 배출은 탈질 및 질산화 과정에서 배출되며, 토양온도, 수분함량 및 무기태 질소함량 등 다양한 환경요인이 N₂O 배출에 영향을 받는다. 특히 일반퇴비 처리시 N₂O의 배출량은 다른 처리구에 비해 높았는데, 이는 가축분 내에 존재하는 질소함유 유기물이 분해가 활발했기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 MC처리시 N₂O 배출량은 일반퇴비에 비해 감소하였다. 이러한 결과는 MC 내에 포함된 바이오차가 일부 토양 pH 증가시키고, 미생물의 군집이 변화, 질산화 및 탈질 유전자의 감소로 인하여 N₂O 배출량이 감소한 것으로 판단되며, 이에 대한 체계적인 메커니즘 분석이 필요할 것으로 판단된다. 본 시험에서 CH₄의 배출량은 처리시일과 관계없이 극미량으로 검출되거나 불검출되었다. 일반적으로 CH₄는 메탄생성 미생물에 지배적인 영향을 받는데, 이는 대부분 극혐기적상태일 때 활성화 되는 것으로 알려져 있다.

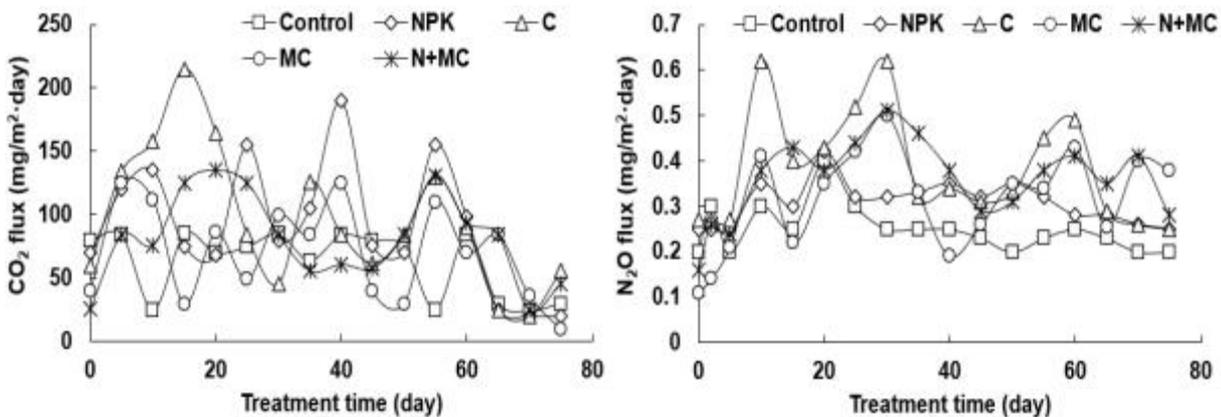


Fig. 5-30. 개발된 MC 처리에 따른 콩재배지로부터 배출되는 온실가스 배출특성.

④ 토양 내 미생물상 변화

개발된 MC 처리에 따른 토양 미생물상 변화 결과는 Table 5-39에서 보는 것과 같다. 총 FAME 함량이 149.8 nmol/g이었으며 총 세균 함량은 60.5 nmol/g, 그람음성 세균은 21.0 nmol/g으로 NPK처리구와 유사한 경향이었다. 특히 대조구인 왕겨의 총 FAME 함량이 161.3 nmol/g이었으며 총 세균 함량은 60.8 nmol/g, 그람음성 세균은 34.8 nmol/g으로 무처리 및 NPK 처리구에 비해 높은 결과를 보였다. 개발된 MC의 토양 처리 시 Total FAMEs, 그람음성 및 그람양성균이 증가하는 경향이었으며, 이는 MC의 처리량에 의존적으로 증가하였다. 일반적으로 토양 유기물에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, MC 및 대조구인 왕겨 퇴비 처리시 토양 유기물이 증가함에 따라 미생물 수는 증가한 것으로 판단된다.

Table 5-39. 개발된 MC 처리조건별 토양 미생물상 변화

처리	Total FAMEs (nmol/g)	Total bacterial (nmol/g)	Gram negative bacteria (nmol/g)	Gram positive bacteria (nmol/g)	Actinomycetes (nmol/g)	Fungi (nmol/g)	Arbuscular mycorrhizal fungi (nmol/g)
무처리	149.8	60.5	36.9	21.0	1.61	20.1	2.93
대조구 (왕겨)	161.3	60.8	34.8	23.1	1.99	20.8	3.13
NPK	152.3	56.3	33.2	20.1	1.88	23.3	3.13
갈짚-C100	173.5	62.8	36.9	22.7	2.08	24.4	3.22
갈짚-C200	181.6	88.0	54.0	30.7	1.92	18.9	3.06
갈짚-C400	190.8	95.4	53.1	40.0	2.05	21.0	3.17
N+갈짚-C100	183.8	91.8	59.8	29.9	1.84	19.8	2.85
N+갈짚-C200	189.1	104.4	61.1	40.4	1.97	20.4	2.96
N+갈짚-C400	198.7	104.5	60.6	41.1	1.97	20.0	3.02

(5) 깔짚 실증 실험

(가) 1차 실증 실험

깔짚 실증 실험을 위한 깔짚은 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚을 활용하였다. 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚의 수분함량은 각각 14.69, 12.96 및 43.13%로 바이오차 혼합깔짚의 수분함량이 가장 높았다. 바이오차 혼합깔짚의 용적중이 왕겨에 비해 매우 높게 나오고 수분 흡수율은 비교적 낮은 결과가 확인되었는데 이는 바이오차 혼합깔짚의 초기 수분함량이 높기 때문으로 판단된다. 바이오차 혼합깔짚에서는 살모넬라, 아플라톡신 및 오크라톡신 분석 결과 미검출되었기 때문에 바이오차 혼합깔짚은 독성에 의한 문제는 발생되지 않을 것으로 판단된다.

Table 5-40. 깔짚 종류별 특성 분석

	수분	살모넬라	아플라 톡신	오크라 톡신	용적중	시료량	시료 부피	넣은 물	함수량	수분 흡수율
	%		---- ppb ----	----	g/L	g	----- mL -----			%
왕겨	14.69	음성	미검출	7.40	85	30	353	900	56	187
대패밥	12.96	음성	미검출	7.00	55	30	545	900	69	230
바이오차 혼합깔짚	43.13	음성	미검출	미검출	448	30	67	900	28	93

실증 시험에 사용된 깔짚의 수분 흡수율을 분석하는 과정에서 바이오차 혼합깔짚의 경우 성상에 따라서 일부는 부상되고 일부는 가라앉는 현상을 확인하였다.

바이오차 혼합깔짚의 입자도를 확인하기 위해 입자 크기에 따라 분류한 결과 분진 수준의 입자 사이즈가 78.3%로 매우 많은 것을 확인하였다.

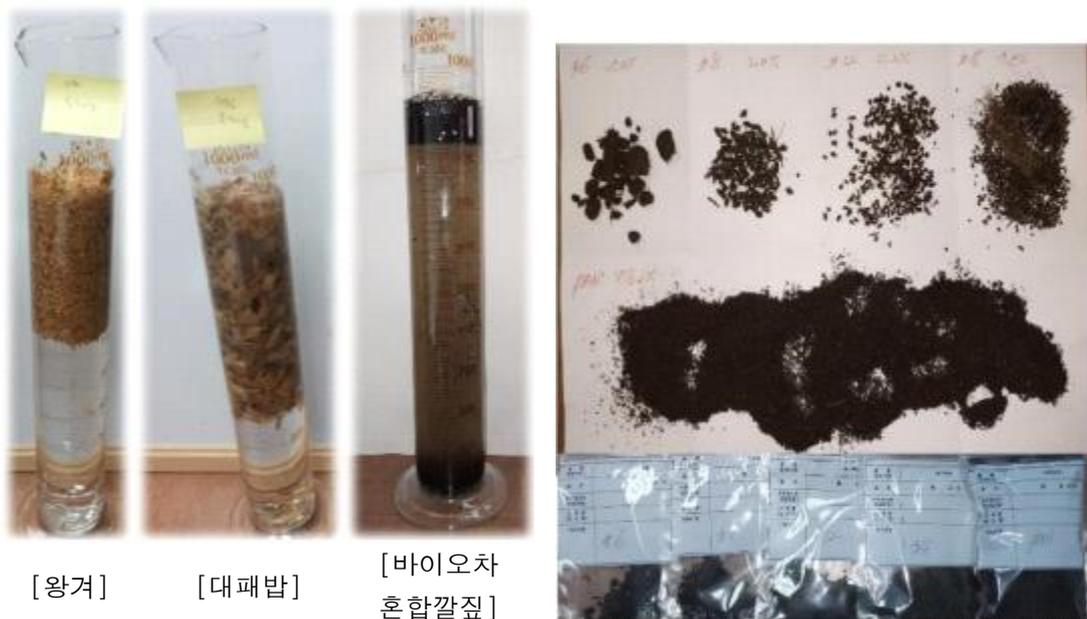


Fig. 5-31. 깔짚 종류별 수분 흡수율 분석 전경 및 바이오차 혼합깔짚의 입자도 분석 전경

1차 사양 실험 결과 35일령의 평체는 대패밥, 왕겨 및 바이오차 혼합깔짚에서 각각 2239, 2180 및 2167 kg 순으로 높았으며, 35일령의 누적 사료 섭취량은 평체와 동일한 순으로 대패밥, 왕겨 및 바이오차 혼합깔짚에서 각각 3227, 3136 및 3095 kg으로 확인되었다. 1.5 kg으로 보정한 FCR은 대패밥, 바이오차 혼합깔짚 및 왕겨 순으로 각각 1220, 1227 및 1234로 확인되었으며, 생산 지수는 대패밥, 왕겨, 바이오차 혼합깔짚에서 각각 443, 422 및 396이었다. 육성율은 대패밥, 왕겨 및 바이오차 혼합깔짚에서 각각 99.7, 97.3 및 91.1%로 바이오차 혼합깔짚의 경우 4주령 이후 폐사가 많아져 육성율이 하락하였다. 전반적인 사육 성적은 대패밥이 가장 우수하였다.

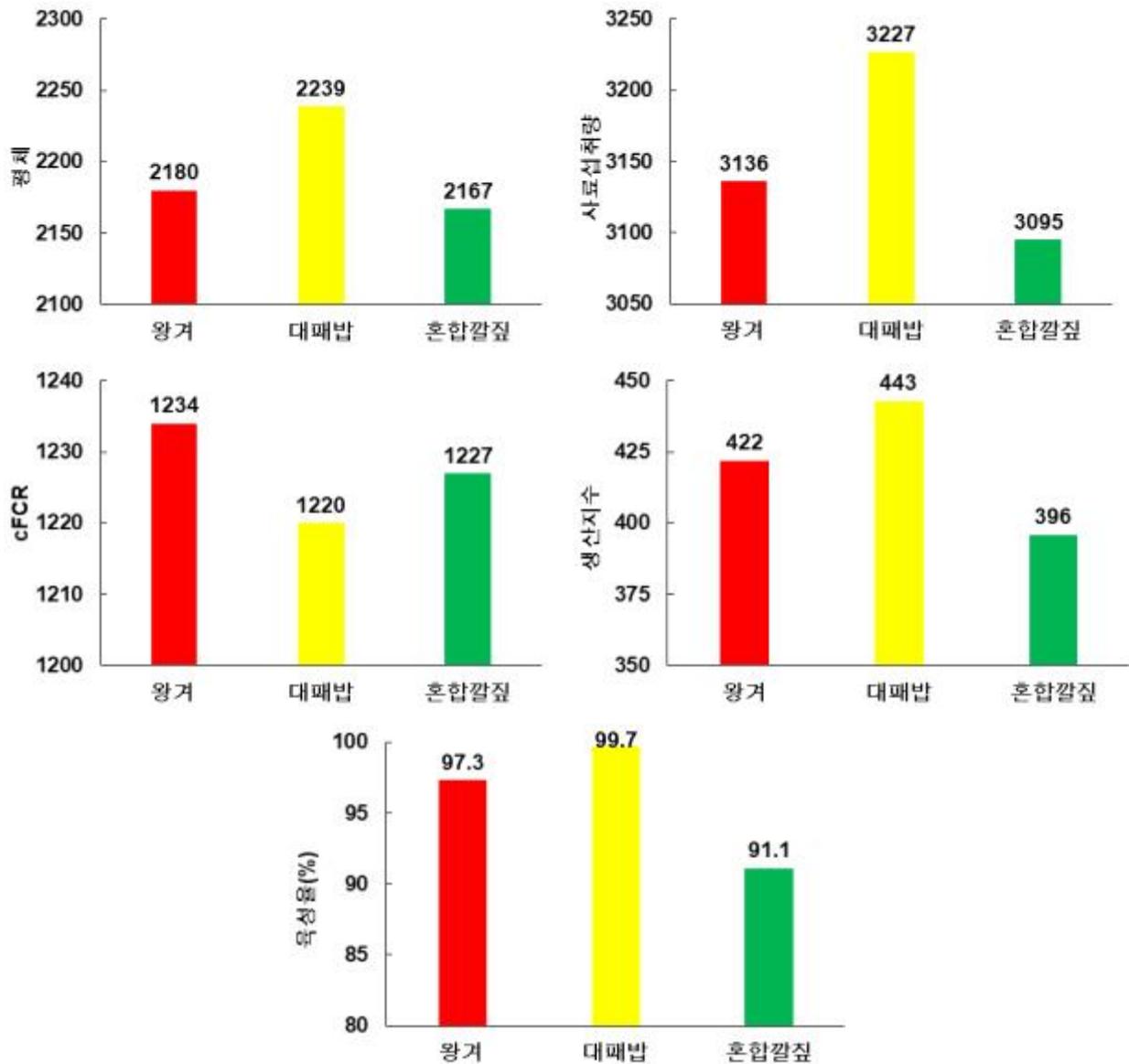


Fig. 5-32. 1차 사양 실험에서의 평체, 사료섭취량, cFCR, 생산지수 및 육성율

깔짚 종류별 폐사율은 바이오차 혼합깔짚, 왕겨 및 대패밥에서 각각 8.6, 2.0 및 0.3%로 바이오차 혼합깔짚의 폐사율이 가장 높았다. 바이오차 혼합깔짚에서 폐사율이 높게 나온 원인을 확인하기 위해 4주령 이후 폐사된 개체의 부검 결과 복수증이 확인되었다. 복수증은 닭의 호흡기에 문제가 생겨 발생하는 질병으로 바이오차 혼합깔짚의 입자의 크기가 너무 작아 닭의 호흡기로 들어가면서 폐사율이 높게 나온 것으로 판단된다.



Fig. 5-33. 바이오차 혼합깔짚 처리구에서 폐사된 개체의 부검 사진

Table 5-41. 1차 실증 실험 폐사 현황

구분	입추수	4주령 이전(0~28일)	4주령 이후(29일 ~)	합계	폐사율(%)
왕겨	300	5	1	6	2.0%
대패	350	1	0	1	0.3%
바이오차 혼합깔짚	350	14	16	30	8.6%

1차 실증 실험에서 일령별로 개체의 상태를 관찰한 결과 7일령에 바이오차 혼합갈짚 처리구 내 일부 개체의 깃털이 검은색으로 변색된 것을 확인하였다. 11일령 및 14일령에서 왕겨, 대패밥 처리구에서 개체의 가슴부위가 붉어졌고, 바이오차 혼합갈짚 처리구에서는 날개, 등 및 깃털은 검은색으로 변색되었으나, 가슴부위는 양호하고, 바이오차 혼합갈짚 입자가 가슴부위에 일부 덩어리지는 것을 확인하였다. 닭발의 경우 모든 처리구에서 양호한 상태를 보였다.



Fig. 5-34. 1차 실증 실험의 일령별 개체 육안 관찰

1차 실증 시험에서 육계 사육 전 기간의 깔짚 종류별 복합 악취 발생량은 톱밥, 왕겨 및 바이오차 혼합깔짚 순으로 높게 나타났다. 바이오차 혼합깔짚의 악취 저감 효율은 왕겨 대비 33.3%, 대패밥 대비 39.9%였으며, 바이오차 혼합깔짚이 계분뇨에서 발생하는 악취를 효율적으로 저감하는 것을 확인하였다.

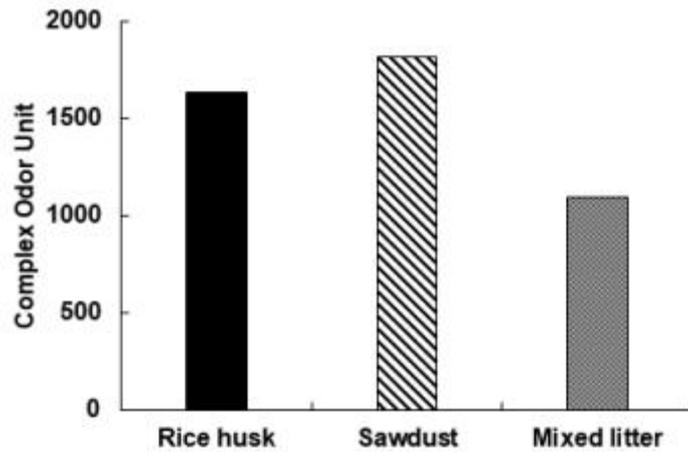


Fig. 5-35. 육계 사육 전기간의 깔짚 종류별 복합 악취 발생량

육계 사육 기간 중 전 기간에서 CH₄는 발생되지 않았다.

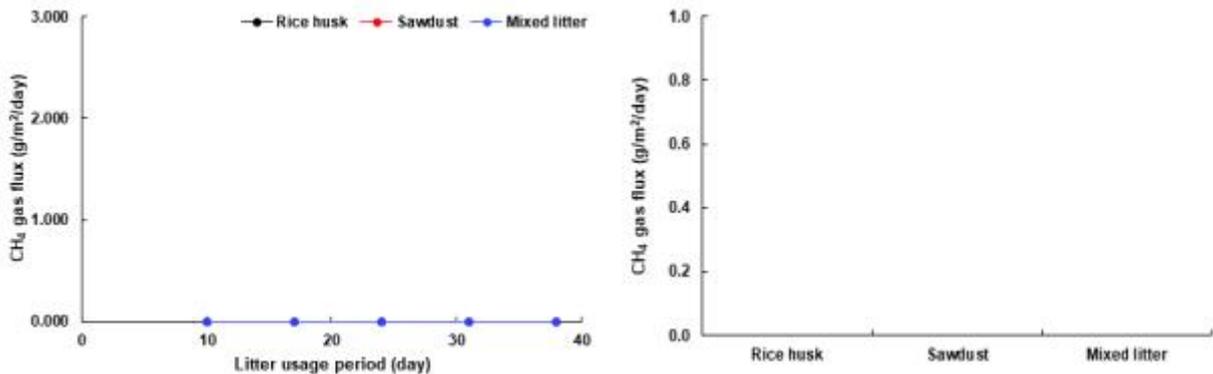


Fig. 5-36. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 CH₄ 발생량 및 누적 발생량.

왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚에서 모두 사육 초중기에 CO₂가 거의 발생하지 않았지만, 사육 후기(38d)에 CO₂ 발생이 급격하게 증가하였다. CO₂ 발생량은 바이오차 혼합깔짚, 대패밥 및 왕겨 순으로 높았다.

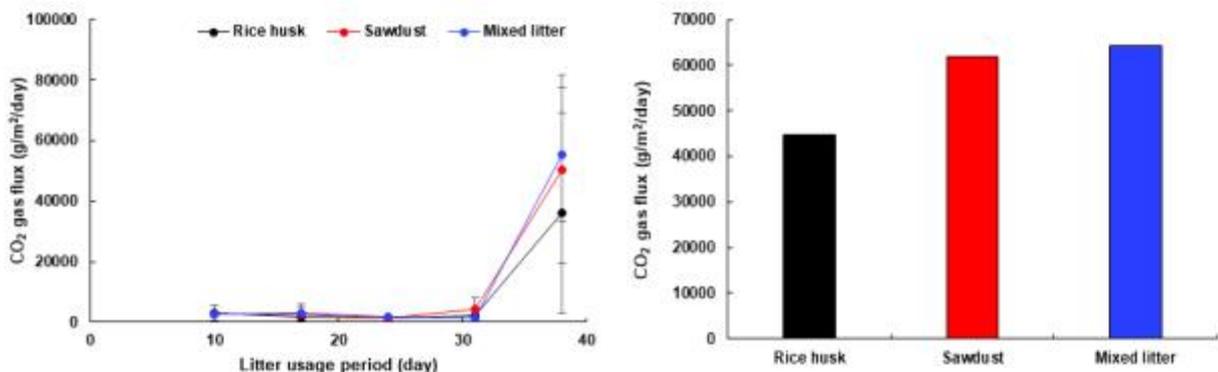


Fig. 5-37. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 CO₂ 발생량 및 누적 발생량.

육계 사육 기간 중 N₂O 발생량은 CO₂ 발생 패턴과 유사하게 육계 사육 후기에 급격하게 증가하였다. 깔짚 종류별 N₂O 발생량은 왕겨, 바이오차 혼합깔짚, 대패밥 순으로 높았다.

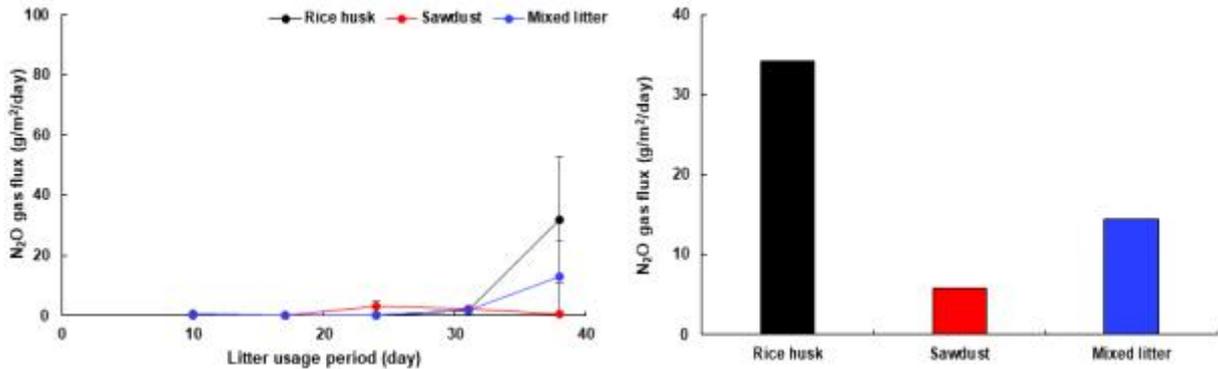


Fig. 5-38. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 N₂O 발생량 및 누적 발생량.

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 pH를 조사한 결과 사육 초기에는 중성 pH 였지만 분뇨가 배출됨에 따라 점점 pH가 높아져 사육 후기에 pH가 약염기성을 띠었다.

Table 5-42. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 pH 변화

	pH(1:10)				
	10 days	17 days	24 days	31 days	38 days
Rice husk	7.58	6.13	6.99	7.57	8.34
Sawdust	6.83	5.94	6.49	7.32	8.44
Mixed litter	6.71	7.31	7.29	7.63	8.28

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 EC 변화를 조사한 결과, 모든 깔짚에서 계분뇨가 배출됨에 따라 EC가 증가하는 경향을 보였다. EC의 증가 범위는 왕겨에서 가장 크게 나타났다.

Table 5-43. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 EC 변화

	EC(dS/m)				
	10 days	17 days	24 days	31 days	38 days
Rice husk	10.67	31.53	36.92	44.67	49.27
Sawdust	25.41	41.21	45.50	54.73	48.20
Mixed litter	11.10	21.51	32.99	35.34	41.43

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 T-N 함량은 사육 기간이 증가함에 따라 함께 증가하였으며, 육계 사육 38일 후 대패밥의 T-N 함량이 1.28%로 가장 높게 나타났다.

Table 5-44. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 T-N 변화

	T-N(%)				
	10 days	17 days	24 days	31 days	38 days
Rice husk	0.39	0.37	0.52	0.82	0.92
Sawdust	0.34	0.34	0.35	0.79	1.28
Mixed litter	0.55	0.46	0.70	0.86	0.92

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 무기성분 함량을 조사한 결과, 사육 기간이 증가할수록 무기성분 함량도 증가하는 경향을 보였다.

Table 5-45. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 무기성분 함량 변화

		K	Ca	Mg	Na	P	Fe	Mn	Li
		(mg/kg)							
10 days	Rice husk	8881.6	4796.9	1559.1	289.7	6027.2	210.8	504.2	ND
	Sawdust	8708.1	5827.7	1668.1	473.3	7199.2	804.7	209.3	ND
	Mixed litter	9989.0	20388.4	6502.2	1846.7	12432.2	5068.5	520.0	4.8
17 days	Rice husk	10121.7	5680.6	2594.5	972.5	13823.1	1771.8	335.5	0.4
	Sawdust	22986.8	11179.4	5139.1	974.0	19909.3	1518.0	355.2	ND
	Mixed litter	8309.3	20204.4	4671.2	7339.1	17499.4	6125.3	355.5	1.0
24 days	Rice husk	14213.4	13320.4	4007.6	1845.3	32133.4	620.7	429.4	ND
	Sawdust	108605.1	6856.0	2123.6	1604.9	15646.8	390.0	184.7	ND
	Mixed litter	49642.1	14488.8	6059.5	1769.9	34608.8	1799.6	427.4	0.3
31 days	Rice husk	47925.3	14655.6	4755.0	2606.1	52050.8	539.1	464.3	ND
	Sawdust	63649.9	15701.5	4600.3	2615.5	50497.2	576.2	379.0	ND
	Mixed litter	42192.4	17471.6	6032.0	2714.6	48766.7	2430.5	430.1	ND
38 days	Rice husk	64347.9	22943.4	6605.6	3552.2	95473.7	457.6	535.6	ND
	Sawdust	79376.1	21678.9	10000.6	3996.6	101126.4	997.6	562.1	ND
	Mixed litter	80520.8	25223.1	7547.3	3901.6	84068.2	971.6	557.6	ND

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 유해성분 함량을 조사한 결과, Cu 및 Zn가 비교적 높은 함량이 검출되었지만 가축분퇴비의 공정규격에 부합하는 것을 확인하였다.

Table 5-46. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 유해성분 함량 변화

		As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
		----- (mg/kg) -----							
10 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	39.2	97.5	34.0	186.8
	Sawdust	1.0	ND	ND	ND	6.7	96.6	ND	144.5
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	73.1	132.2	10.2	208.2
17 days	Rice husk	1.4	ND	ND	ND	4.4	141.0	ND	165.2
	Sawdust	0.6	ND	ND	ND	23.8	77.5	2.2	486.7
	Mixed litter	1.9	ND	ND	ND	19.0	108.6	ND	237.2
24 days	Rice husk	9.3	ND	ND	ND	22.7	290.2	27.5	474.5
	Sawdust	2.6	0.4	ND	ND	11.3	198.9	ND	201.1
	Mixed litter	1.3	0.6	ND	ND	15.5	222.2	0.3	231.8
31 days	Rice husk	ND	0.3	ND	ND	0.3	297.0	15.4	232.6
	Sawdust	ND	0.9	ND	ND	4.8	301.1	0.2	299.6
	Mixed litter	ND	1.6	ND	ND	10.0	258.2	ND	540.4
38 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	4.2	336.4	1.3	468.3
	Sawdust	0.5	ND	ND	ND	5.2	327.8	6.4	381.8
	Mixed litter	ND	0.4	ND	ND	32.6	263.4	3.6	295.8

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 부숙도 판정 결과, 사육 초기에 분뇨가 많이 배출되기 전에는 부숙완료가 나왔다. 하지만 사육 후기(38d)로 가면서 왕겨 및 대패밥은 부숙후기 및 부숙중기로 바뀌었지만 바이오차 혼합깔짚은 부숙완료로 유지되었다.

Table 5-47. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 부숙도 판정

	10 days	17 days	24 days	31 days	38 days
Rice husk	부숙완료	부숙완료	부숙완료	부숙완료	부숙후기
Sawdust	부숙완료	부숙완료	부숙완료	부숙후기	부숙중기
Mixed litter	부숙완료	부숙완료	부숙완료	부숙완료	부숙완료

(나) 2차 실증 실험

1차 실증 실험에서 바이오차 혼합깔짚의 입자 크기가 작아 폐사율이 높게 나타난 것으로 판단되어 2차 실증 실험에서는 바이오차 혼합깔짚의 입자 크기를 크게하여 실증 실험을 수행하였다. 왕겨 및 대패밥은 1차 실증 실험과 동일한 깔짚을 사용하였다. 바이오차 혼합깔짚의 입자도 분석 결과 분진과 같은 입자는 28%로 분진의 함량이 낮아지고 입자의 크기가 대체적으로 큰 것이 확인되었다. 이로 인해 실험 계사 내부의 가루 날림 현상이 없어지게 되었다.

1차 사양 실험 결과 35일령의 평체는 바이오차 혼합깔짚, 대패밥 및 왕겨에서 각각 2178, 2098 및 2066 kg 순으로 높았으며, 35일령의 누적 사료 섭취량은 바이오차 혼합깔짚, 대패밥 및 왕겨에서 각각 3049, 2974 및 2946 kg으로 확인되었다. 1.5 kg으로 보정한 FCR은 바이오차 혼합깔짚, 대패밥 및 왕겨 순으로 각각 1198, 1239 및 1258로 확인되었으며, 생산 지수는 바이오차 혼합깔짚, 대패밥 및 왕겨에서 각각 431, 421 및 404이었다. 육성율은 대패밥, 왕겨 및 바이오차 혼합깔짚에서 각각 99.5, 97.3 및 97.1%로 1차 실증 실험과 달리 바이오차 혼합깔짚에서 사양 후기 폐사로 인한 육성율 하락 현상이 나타나지 않았다. 전반적인 사육 성적은 바이오차 혼합깔짚이 가장 양호하였다.

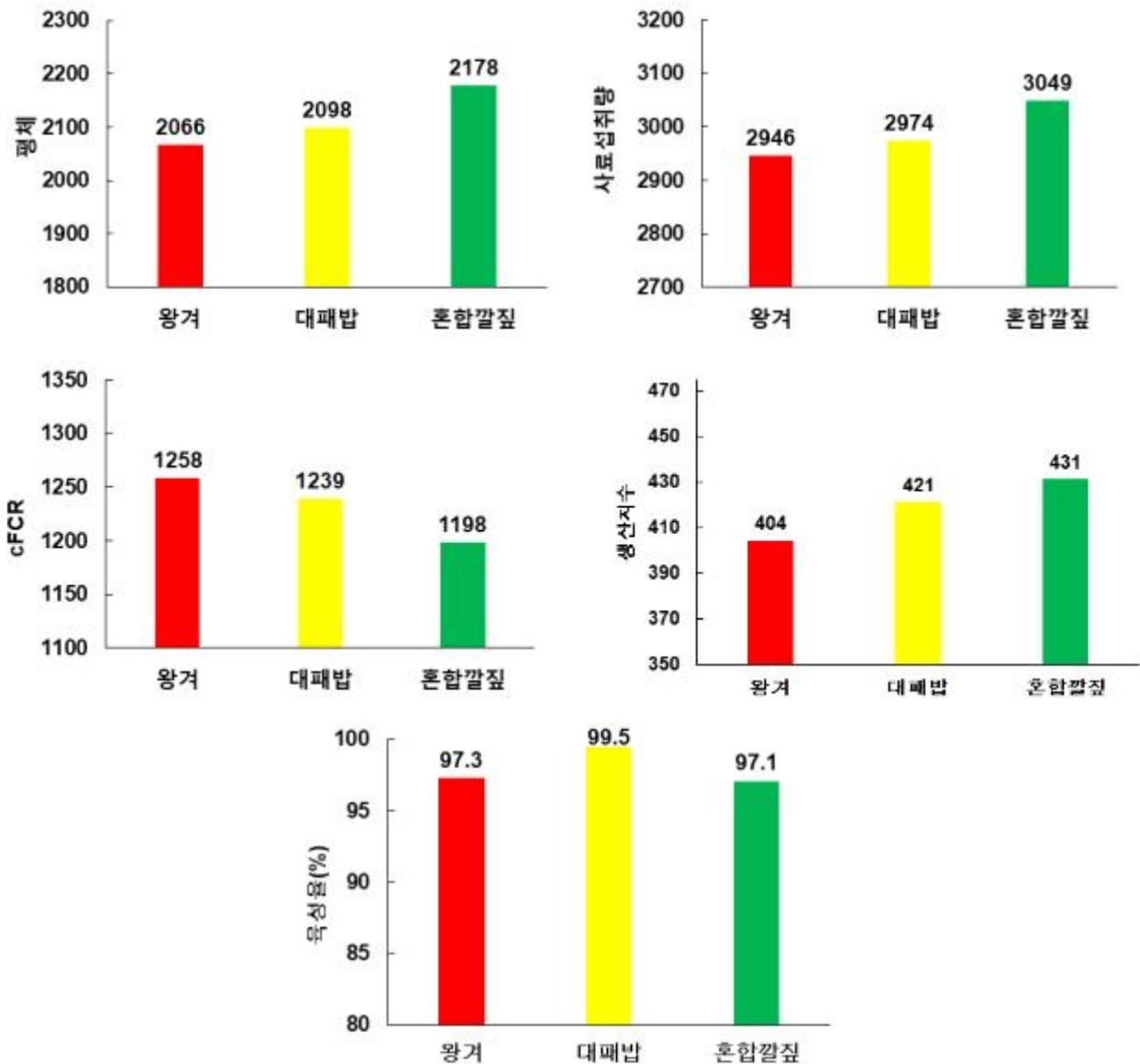


Fig. 5-39. 1차 사양 실험에서의 평체, 사료섭취량, cFCR, 생산지수 및 육성율

2차 실증 실험에서 육계 사육 전 기간의 깔짚 종류별 복합 악취 발생량은 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚 순으로 높게 나타났다. 바이오차 혼합깔짚의 악취 저감 효율은 왕겨 대비 21.1%, 대패밥 대비 19.5%였으며, 바이오차 혼합깔짚이 악취를 효과적으로 저감하는 것을 확인하였다.

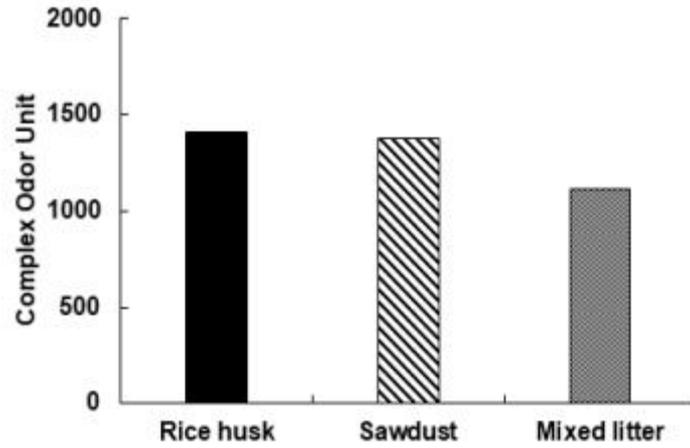


Fig. 5-40. 육계 사육 전기간의 깔짚 종류별 복합 악취 발생량

육계 사육 기간 중 모든 깔짚에서 CH₄는 발생되지 않았다.

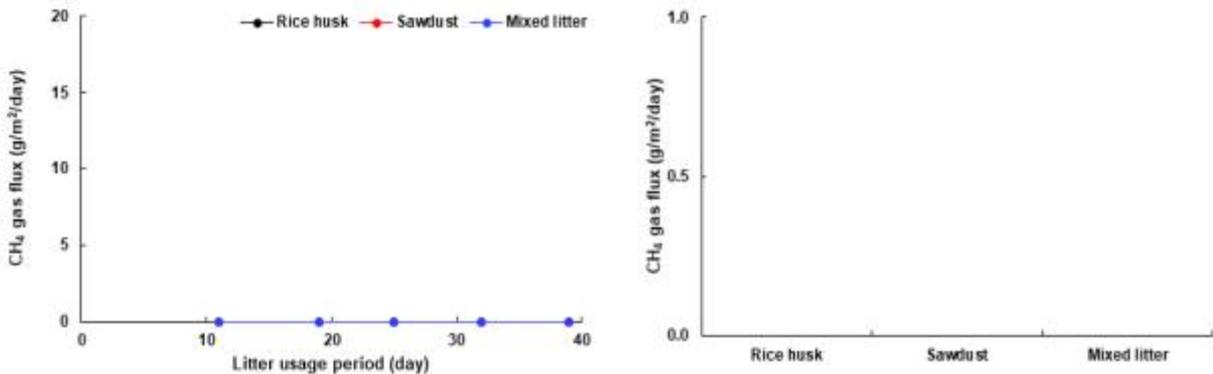


Fig. 5-41. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 CH₄ 발생량 및 누적 발생량.

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 CO₂ 발생량 및 누적 발생량은 Fig. 5-42에서 보는 바와 같다. 왕겨, 대패밥, 바이오차 혼합깔짚에서 모두 CO₂ 발생량이 서서히 증가하여 육계 사육을 시작한 지 32일 후에 CO₂ 발생량이 최대였으며 이후 감소하였다. CO₂ 누적 발생량은 왕겨, 바이오차 혼합깔짚, 대패밥 순으로 높았다.

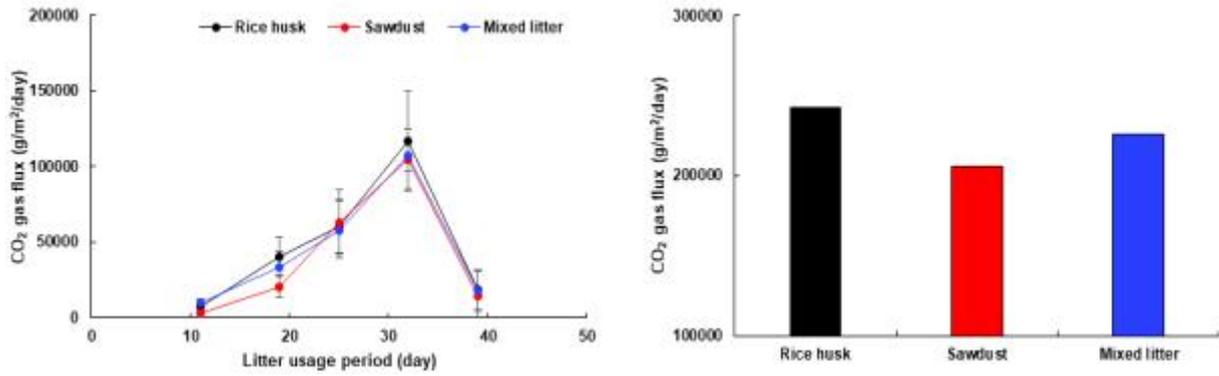


Fig. 5-42. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 CO₂ 발생량 및 누적 발생량.

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 N₂O 발생량 및 누적 발생량은 Fig. 5-43에서 보는 바와 같다. N₂O 발생량은 CO₂ 발생 패턴과 유사하게 서서히 증가하여 사육 32일 후에 N₂O 발생량이 최대였으며 이후 감소하였다. N₂O 누적 발생량은 바이오차 혼합깔짚, 왕겨, 대패밥 순으로 높았다.

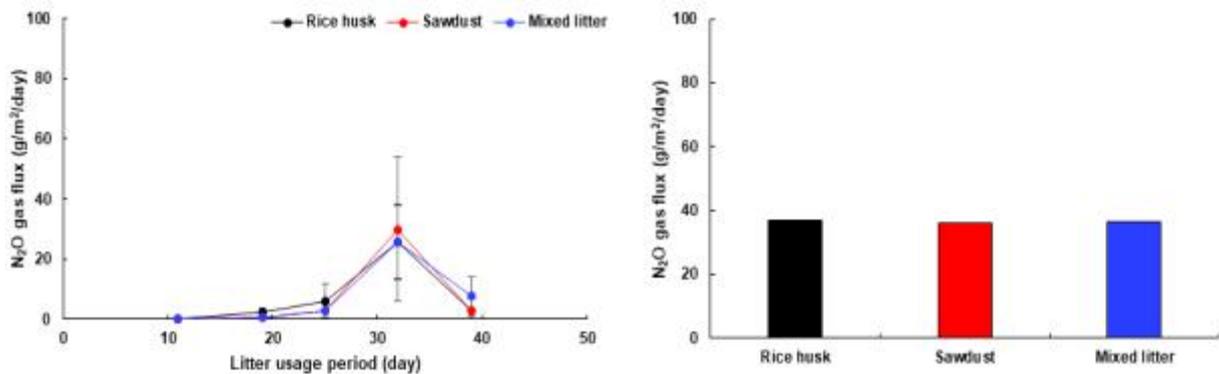


Fig. 5-43. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 N₂O 발생량 및 누적 발생량.

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 pH 변화를 조사한 결과, 사육 초기에는 중성 pH였지만 사육 기간이 증가할수록 pH도 증가하여 사육 후기에 모든 깔짚에서 약염기의 pH가 확인되었다. 최종적으로 깔짚별 pH는 왕겨, 바이오차 혼합깔짚 및 대패밥에서 각각 8.32, 8.29 및 8.09였다.

Table 5-48. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 pH 변화

	pH(1:10)				
	11 days	19 days	25 days	32 days	39 days
Rice husk	6.77	7.75	7.65	7.57	8.32
Sawdust	6.58	7.25	7.38	7.59	8.09
Mixed litter	6.94	7.71	7.68	7.96	8.29

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 EC 변화를 조사한 결과, 세 가지 깔짚에서 모두 사육 초중반에 비해 사육 중후기의 EC가 감소하는 경향을 보였다. 최종적으로 깔짚별 EC는 대패밥, 바이오차 혼합깔짚 및 왕겨에서 각각 3.57, 3.39 및 1.86 dS/m였다.

Table 5-49. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 EC 변화

	EC(dS/m)				
	11 days	19 days	25 days	32 days	39 days
Rice husk	6.96	9.79	4.91	2.38	1.86
Sawdust	12.00	21.03	2.37	2.48	3.57
Mixed litter	9.04	21.45	2.37	2.45	3.39

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 T-N 함량은 왕겨와 톱밥의 경우 사육 중기(25d)까지 감소하다가 사육 후기에 증가하는 경향을 보였다. 바이오차 혼합깔짚의 경우 사육 기간이 증가함에 따라 함께 증가하였다.

Table 5-50. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 T-N 변화

	T-N(%)				
	11 days	19 days	25 days	32 days	39 days
Rice husk	0.55	0.31	0.32	0.44	0.40
Sawdust	0.35	0.29	0.29	0.39	0.48
Mixed litter	0.46	0.47	0.45	0.58	0.61

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 무기성분 함량을 조사한 결과, 사육 기간이 증가할수록 무기성분 함량도 증가하는 경향을 보였다.

Table 5-51. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 무기성분 함량 변화

		K	Ca	Mg	Na	P	Fe	Mn	Li
		----- (mg/kg) -----							
11 days	Rice husk	2868.2	1075.8	212.7	136.7	1009.2	125.3	91.4	ND
	Sawdust	1705.3	1245.1	513.3	141.4	1080.7	156.9	45.3	ND
	Mixed litter	3104.8	4427.6	731.5	581.7	1563.7	633.9	103.3	ND
19 days	Rice husk	3068.3	1498.4	273.1	359.8	1859.9	199.2	73.4	ND
	Sawdust	1640.7	521.6	28.2	189.2	750.5	126.8	29.3	ND
	Mixed litter	3570.2	3195.5	530.0	573.0	1594.9	590.5	78.9	ND
25 days	Rice husk	3269.8	1329.5	253.1	307.6	1773.1	189.4	71.0	ND
	Sawdust	2318.5	1203.1	301.8	249.5	1056.2	151.5	33.6	ND
	Mixed litter	3443.0	3550.3	697.8	576.7	1955.0	566.0	77.1	ND
32 days	Rice husk	3708.7	2169.4	377.7	469.4	2596.7	200.9	64.8	ND
	Sawdust	3340.3	1489.8	256.4	396.7	2255.0	206.2	42.1	ND
	Mixed litter	3828.2	3417.6	599.2	628.3	2764.5	428.1	80.7	ND
39 days	Rice husk	5759.6	3165.4	628.7	639.7	3602.2	276.8	82.6	ND
	Sawdust	5424.7	2825.9	737.6	668.3	3914.9	322.0	67.6	ND
	Mixed litter	5625.6	4854.5	1030.7	1179.6	4093.4	593.2	132.7	ND

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 유해성분 함량을 조사한 결과, Cu 및 Zn가 비교적 높은 함량이 검출되었지만 가축분퇴비의 공정규격에 부합하는 것을 확인하였다.

Table 5-52. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 유해성분 함량 변화

		As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
		----- (mg/kg) -----							
11 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	12.3	ND	48.6
	Sawdust	ND	ND	ND	ND	ND	19.1	ND	107.8
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	0.3	27.9	ND	84.5
19 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	13.8	ND	58.9
	Sawdust	ND	ND	ND	ND	16.7	8.6	ND	38.5
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	1.7	23.2	ND	72.0
25 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	28.6	ND	64.8
	Sawdust	ND	ND	ND	ND	ND	23.7	ND	48.8
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	ND	27.8	ND	63.7
32 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	31.5	ND	82.2
	Sawdust	ND	ND	ND	ND	ND	22.8	ND	80.4
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	9.1	31.1	ND	95.6
39 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	5.1	70.7	ND	103.4
	Sawdust	ND	ND	ND	ND	0.6	57.8	ND	97.1
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	5.1	68.9	ND	127.0

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 부숙도 판정 결과, 사육 초기에 분뇨가 많이 배출되기 전에는 부숙완료가 나왔다. 하지만 사육 후기(39d)로 가면서 왕겨는 부숙중기, 대패밥은 부숙초기가 나왔으며, 바이오차 혼합깔짚은 부숙후기로 유지되었다.

Table 5-53. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 부숙도 판정

	11 days	19 days	25 days	32 days	39 days
Rice husk	부숙완료	부숙후기	부숙완료	부숙후기	부숙중기
Sawdust	부숙완료	부숙중기	부숙완료	부숙후기	부숙초기
Mixed litter	부숙완료	부숙완료	부숙완료	부숙후기	부숙후기

(다) 3차 실증 실험

3차 실증 실험에 사용한 깔짚은 2차 실증 실험에서 사용한 것과 동일한 깔짚을 사용하였다. 3차 사양 실험 결과 35일령의 평체는 바이오차 혼합깔짚, 왕겨 및 대패밥에서 각각 2157, 2133 및 2113 kg 순으로 높았으며, 35일령의 누적 사료 섭취량은 대패밥, 왕겨 및 바이오차 혼합깔짚에서 각각 3106, 3079 및 3075 kg으로 확인되었다. 1.5 kg으로 보정한 FCR은 바이오차 혼합깔짚, 왕겨 및 대패밥 순으로 각각 1230, 1254 및 1287로 확인되었으며, 전반적인 사육 성적은 바이오차 혼합깔짚이 가장 우수하였다.

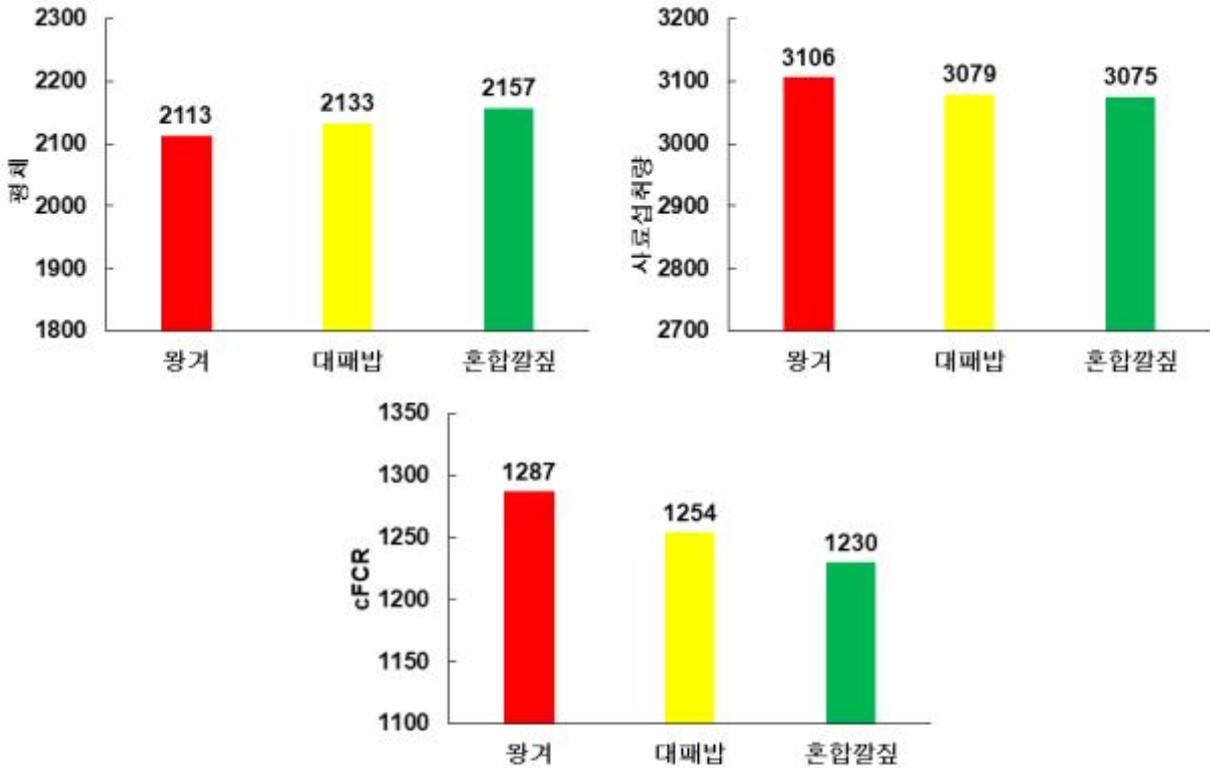


Fig. 5-44. 1차 사양 실험에서의 평체, 사료섭취량 및 cFCR

3차 실증 실험에서 육계 사육 전 기간의 깔짚 종류별 복합 악취 발생량은 대패밥, 왕겨 및 바이오차 혼합깔짚 순으로 높게 나타났다. 바이오차 혼합깔짚의 악취 저감 효율은 왕겨 대비 15.0%, 대패밥 대비 24.3%였으며, 바이오차 혼합깔짚이 악취를 효율적으로 저감하는 것을 확인하였다.

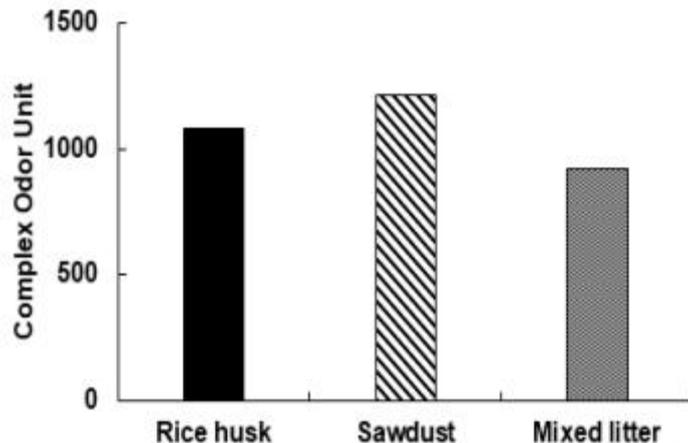


Fig. 5-45. 육계 사육 전기간의 깔짚 종류별 복합 악취 발생량

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 CH₄ 발생량 및 누적 발생량은 Fig. 5-46에서 보는 바와 같다. CH₄는 육계 사육 시작 30일 후에만 발생되었다. CH₄ 발생량은 왕겨, 바이오차 혼합 깔짚 및 대패밥 순으로 높았다.

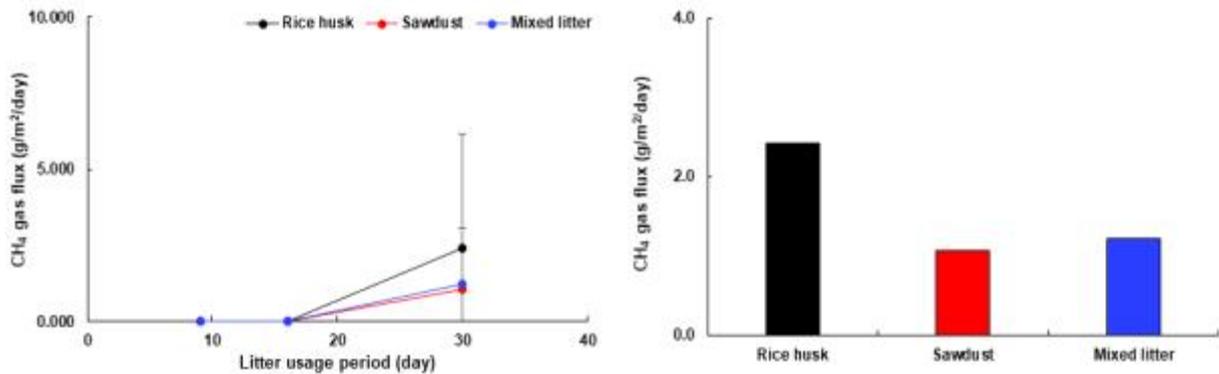


Fig. 5-45. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 CH₄ 발생량 및 누적 발생량.

왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚에서 모두 사육 초기에 CO₂가 거의 발생하지 않았지만, 사육 후기에 CO₂ 발생이 급격하게 증가하였으며, CO₂ 발생량은 대패밥, 바이오차 혼합깔짚 및 왕겨 순으로 높았다.

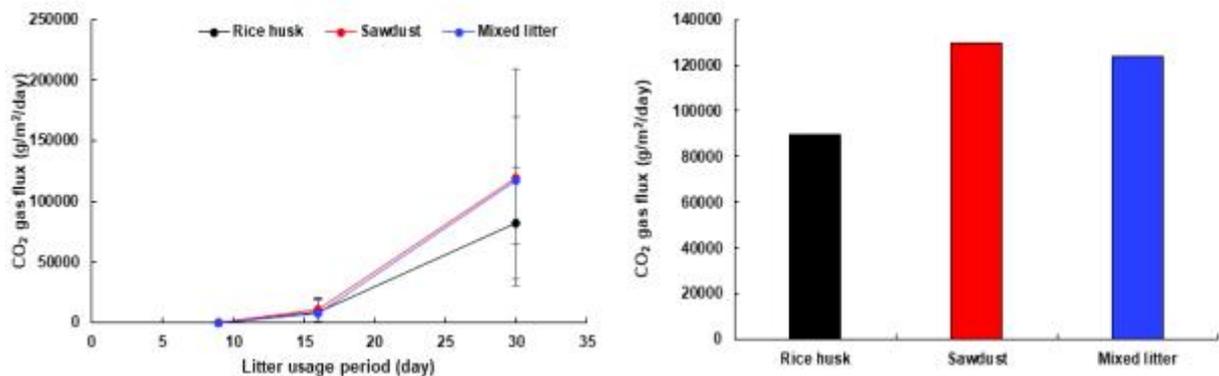


Fig. 5-46. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 CO₂ 발생량 및 누적 발생량.

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 N₂O 발생량은 CO₂ 발생 패턴과 유사하게 육계 사육 후기에 급격하게 증가하였다. N₂O 발생량은 바이오차 혼합깔짚, 왕겨 및 대패밥 순으로 높았다.

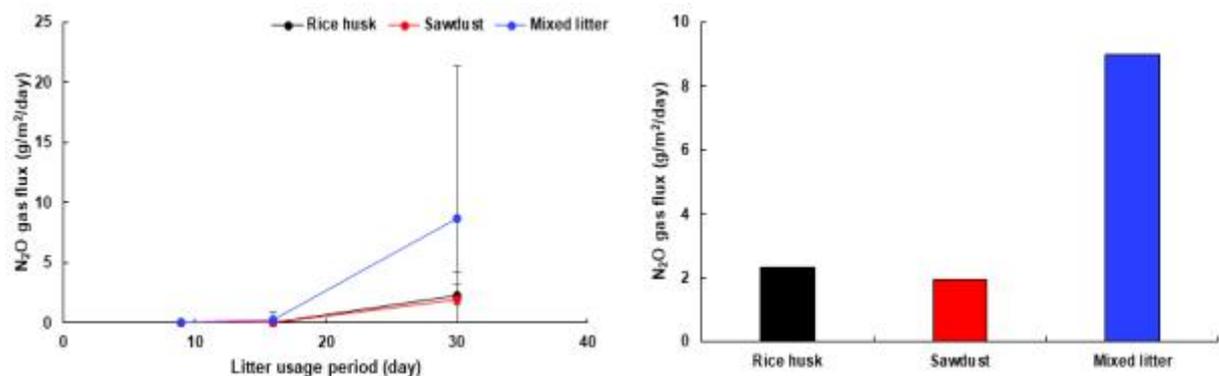


Fig. 5-47. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 N₂O 발생량 및 누적 발생량.

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 pH 변화를 조사한 결과, 사육 초기 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚의 pH는 각각 6.31, 5.88 및 5.45였으며, 사육 후기 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚의 pH는 각각 7.47, 7.79 및 7.77로 증가하였다.

Table 5-54. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 pH 변화

	pH(1:10)		
	9 days	16 days	30 days
Rice husk	6.31	6.58	7.47
Sawdust	5.88	6.40	7.79
Mixed litter	5.45	6.31	7.77

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 EC 변화를 조사한 결과, 사육 초기 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚의 EC는 11.79, 18.20 및 9.15 였으나, 사육 후기 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚의 EC는 32.43, 34.63 및 31.27로 증가하였다.

Table 5-55. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 EC 변화

	EC(dS/m)		
	9 days	16 days	30 days
Rice husk	11.79	26.50	32.43
Sawdust	18.20	29.23	34.63
Mixed litter	9.15	21.56	31.27

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 T-N 함량은 대패밥과 바이오차 혼합깔짚의 경우 사육 기간이 증가함에 따라 함께 증가하는 경향을 보였다. 왕겨의 경우 사육 중기까지 증가하다가 사육 후기에 감소하는 경향을 보였다. 최종적으로 왕겨, 대패밥 및 바이오차 혼합깔짚의 T-N 함량은 각각 0.72, 0.87 및 0.89로 확인되었다.

Table 5-56. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 T-N 변화

	T-N(%)		
	9 days	16 days	30 days
Rice husk	0.82	0.93	0.72
Sawdust	0.48	0.70	0.87
Mixed litter	0.61	0.68	0.89

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 무기성분 함량을 조사한 결과, 사육 기간이 증가할수록 무기성분 함량도 증가하는 경향을 보였다.

Table 5-57. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 무기성분 함량 변화

		K	Ca	Mg	Na	P	Fe	Mn	Li
		----- (mg/kg) -----							
9 days	Rice husk	555.9	3799.1	1121.4	182.4	2573.3	200.7	285.1	ND
	Sawdust	394.9	2967.6	1031.2	75.2	2085.1	297.6	109.1	ND
	Mixed litter	452.9	10928.0	2567.7	1420.2	2775.0	896.6	260.3	ND
16 days	Rice husk	809.9	5692.3	2072.1	497.2	2987.9	297.9	281.2	ND
	Sawdust	484.9	4993.0	2067.0	503.1	3390.7	227.1	114.1	ND
	Mixed litter	597.0	8464.3	2628.0	1385.5	3256.9	468.9	144.8	ND
30 days	Rice husk	676.7	5283.2	1746.9	846.4	3313.5	451.3	200.5	ND
	Sawdust	540.9	5036.0	1887.6	845.2	3283.4	387.9	120.2	ND
	Mixed litter	621.3	8061.6	2303.9	918.7	4048.9	838.3	188.0	ND

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 유해성분 함량을 조사한 결과, 대부분의 유해성분은 검출되지 않았다. Cu 및 Zn가 비교적 높은 함량이 검출되었지만 가축분퇴비의 공정규격에 부합하는 것을 확인하였다.

Table 5-58. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 유해성분 함량 변화

		As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
		----- (mg/kg) -----							
9 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	12.3	ND	48.6
	Sawdust	ND	ND	ND	ND	ND	19.1	ND	107.8
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	0.3	27.9	ND	84.5
16 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	13.8	ND	58.9
	Sawdust	ND	ND	ND	ND	16.7	8.6	ND	38.5
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	1.7	23.2	ND	72.0
30 days	Rice husk	ND	ND	ND	ND	ND	28.6	ND	64.8
	Sawdust	ND	ND	ND	ND	ND	23.7	ND	48.8
	Mixed litter	ND	ND	ND	ND	ND	27.8	ND	63.7

육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 부숙도 판정 결과, 사육 초기에 분뇨가 많이 배출되기 전에는 부숙완료가 나왔다. 하지만 사육 후기로 가면서 대패밥은 부숙후기가 나온 반면에 왕겨와 바이오차 혼합깔짚의 경우 부숙완료로 유지되었다.

Table 5-59. 육계 사육 기간에 따른 깔짚 종류별 부숙도 판정

	9 days	16 days	30 days
Rice husk	부숙완료	부숙완료	부숙완료
Sawdust	부숙완료	부숙완료	부숙후기
Mixed litter	부숙완료	부숙완료	부숙완료

다) 개발된 축사바닥 깔짚 소재의 실용화 및 산업화

(1) 개발된 축사바닥 깔짚 소재 신시장 구축

(가) 신소재 축산 깔짚 제조공장 구축

신소재 축산 깔짚의 대량생산을 위해 참여기업이 경상남도 창원군 내 3000평 부지에 깔짚 제조공장을 건설하고 있으며, 2024년 5-6월경 완공될 예정이다.



Fig. 5-48. 경상남도 창원군 깔짚 제조공장 부지 도면

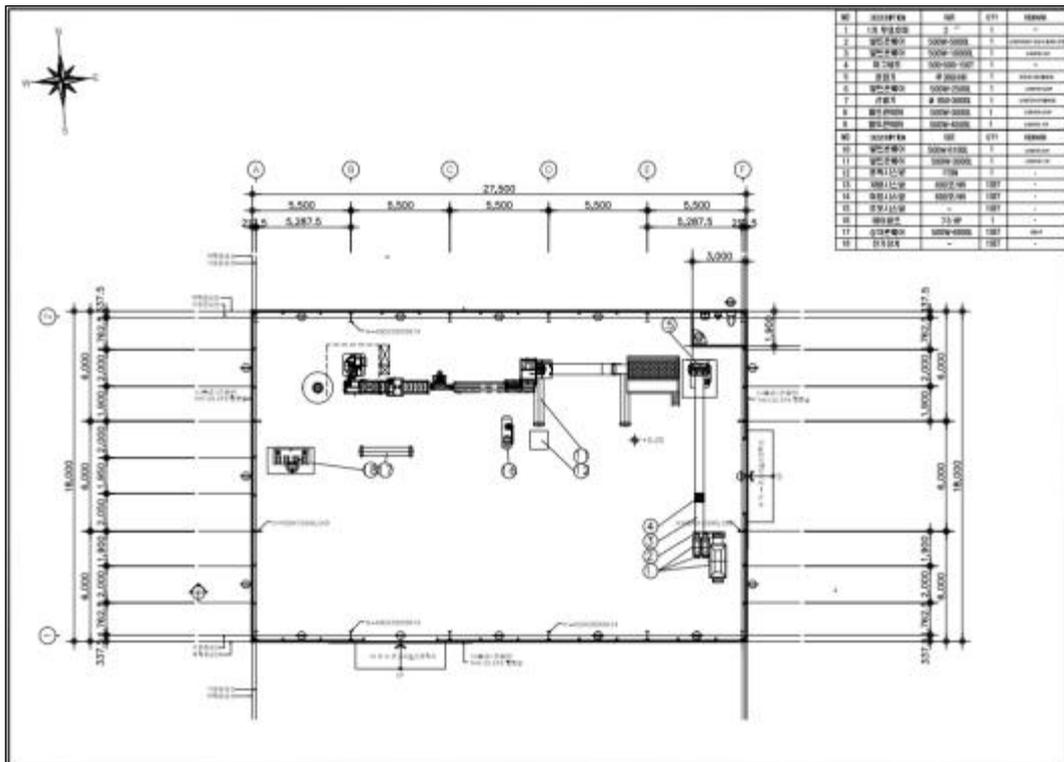


Fig. 5-49. 경상남도 창원군 깔짚 제조공장 설비 도면

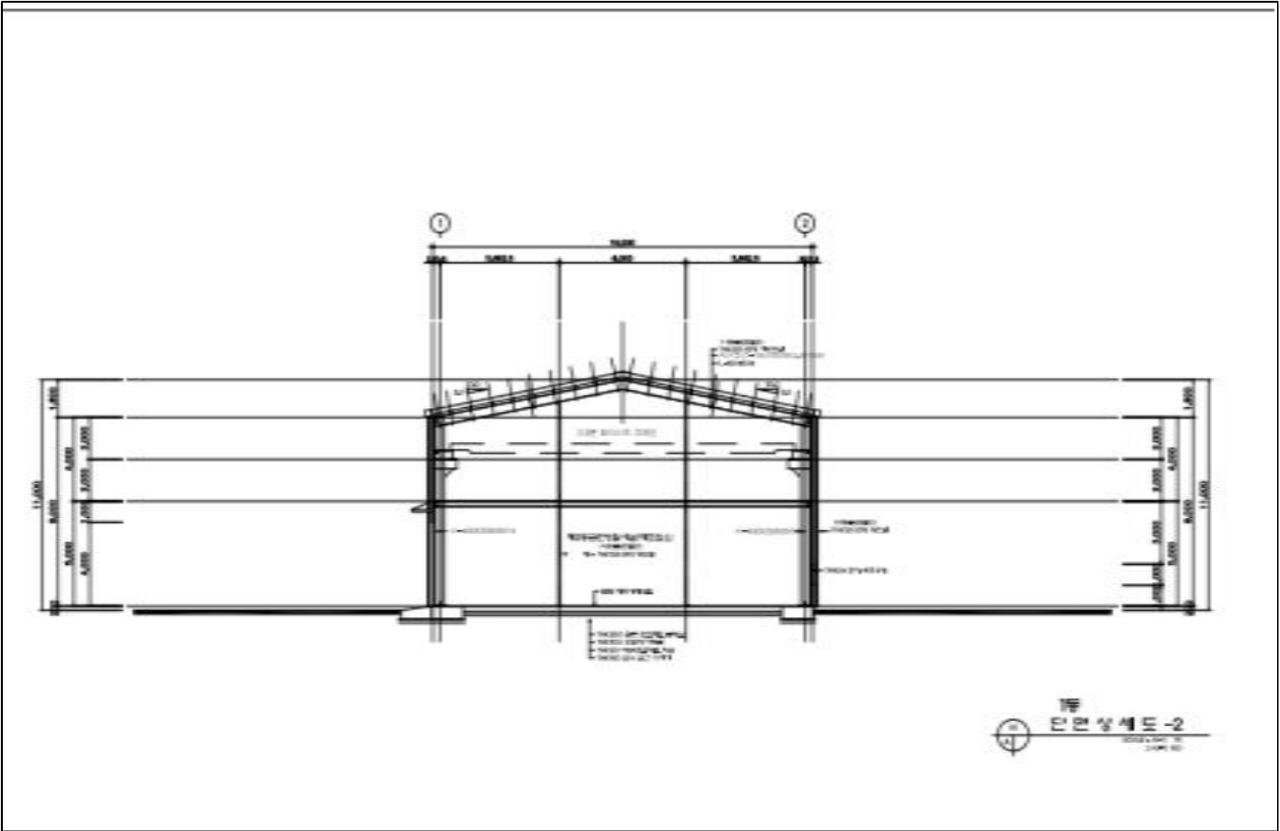


Fig. 5-50. 경상남도 창원군 깔짚 제조공장 설비 단면도

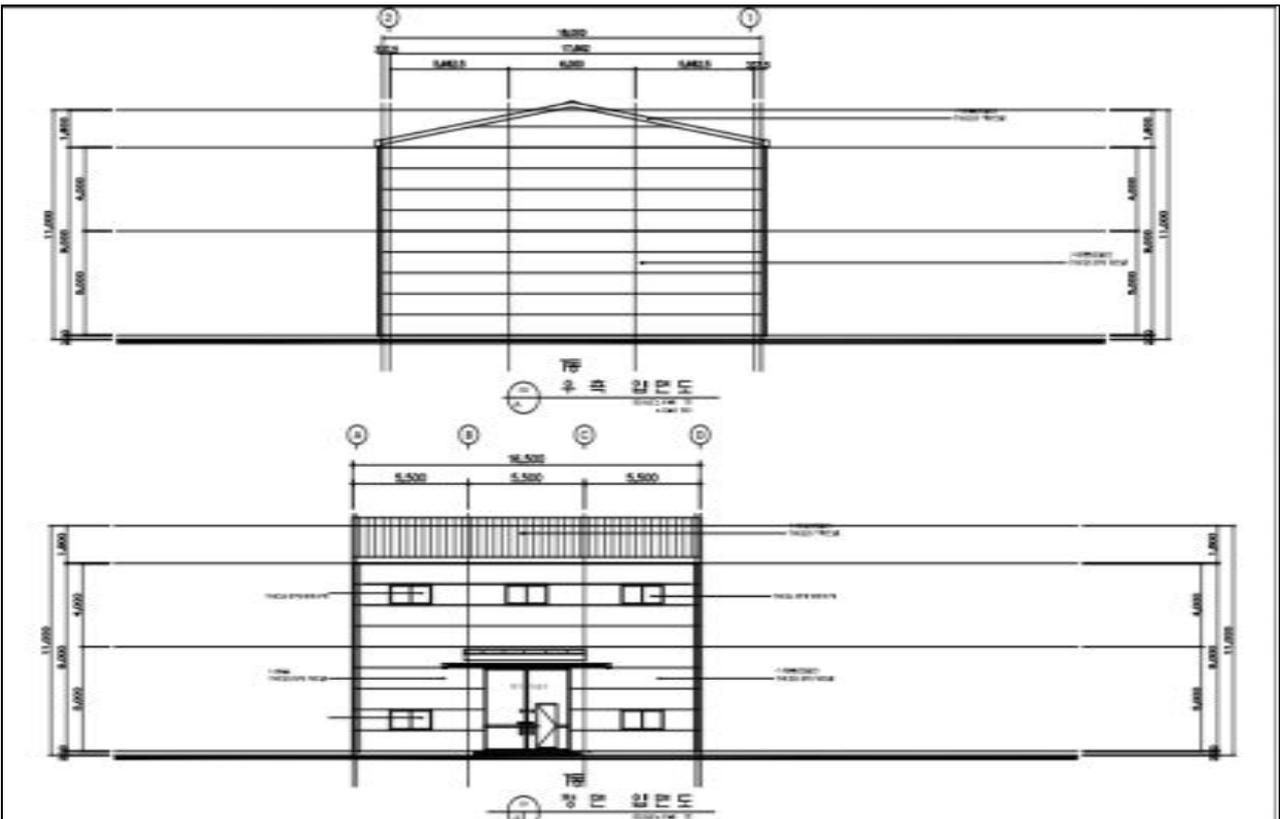


Fig. 5-51. 경상남도 창원군 깔짚 제조공장 설비 우측 및 정면 입면도

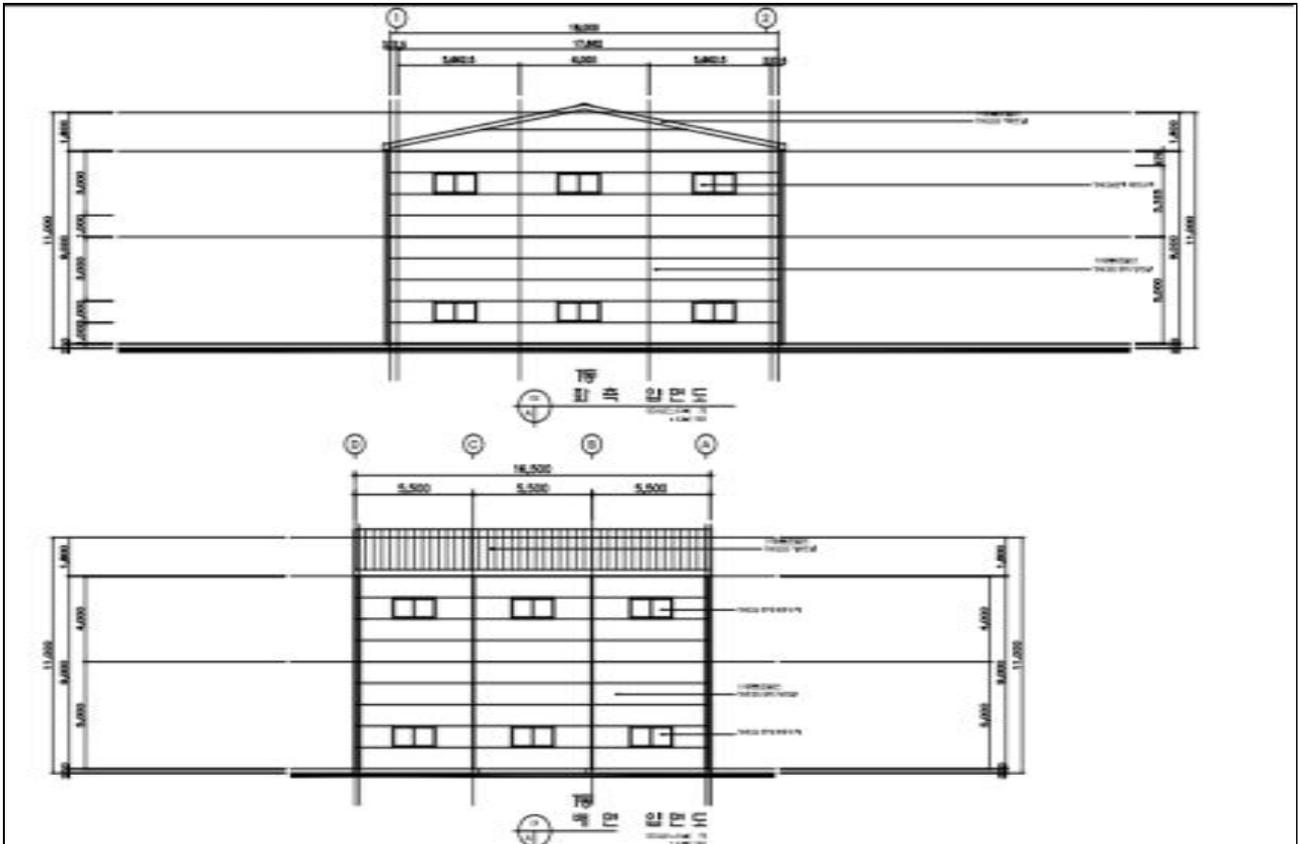


Fig. 5-52. 경상남도 창원군 깔짚 제조공장 설비 좌측 및 배면 입면도

(나) 개발된 깔짚의 재활용환경성 평가

① 사업의 배경 및 목적

㉞ 배경 및 목적

□ 사업배경 및 목적

- 한국남동발전(주)은 장기운영 발전소인 영동예코발전본부에서 “목재의 지속가능한 이용에 관한 법률”에 의한 목재펠릿을 연소하여 전력을 생산하는 발전시설 1호기, 2호기를 설치함으로써 신재생에너지 정책에 부응하고 이를 확대·보급할 계획을 수립하여 운영 중임.
- 한국남동발전(주) 영동예코발전본부는 영동 1호기, 2호기에서 목재펠릿의 사용으로 인하여 발생하는 목재펠릿 재 발생량은 2018년 9,511톤에서 2021년 11,527톤으로 지속적으로 증가되고 있으나, 2020년까지 전량 매립하였고 2021년에는 11,527톤 중 일부(5.1%)만을 고화재로 재활용하고 있는 실정임.
- 한국남동발전(주) 영동예코발전본부의 전소발전소에서 발생하는 목재펠릿 재는 발전과정에서 나오는 부산물인 만큼 추가적인 열투입이 없어 경제성 확보가 가능하고 대규모 안정적 공급이 가능하여 축산분야의 깔짚으로 활용이 가능함. 즉, 그 밖의 연소잔재물(목재펠릿재)을 깔짚으로 재활용하여, 국가 자원순환법과 환경오염예방 및 자원 활용, 효과적인 새로운 깔짚의 대안으로 제시하고 이를 보급하고자 함.
- 국내 축산 농가에서 축사 깔짚으로 대부분 사용하고 있는 톱밥의 경우 수분흡수능력이 우수하고, 다른 부자재에 비해 취급이 용이하고 초기 퇴비화 과정에서 악취 원인물질의 흡착과 같은 장점이 있으나 톱밥원료 대부분이 수입목에 의해 충당되고 있어 지역적으로 톱밥의 가격편중이 심한 상태로 경제성이 부족함.
- 대부분의 한우 농가에서 축사를 효율적으로 관리하기 위하여 톱밥이나 왕겨 등의 부자재를 축사 바닥의 깔짚으로 사용하고 우분뇨가 배설되어 깔짚 내 수분이 포화되고 수분조절 능력이 현저히 감소하면 퇴비사로 옮겨 퇴비화를 진행하게 됨. 그러나 톱밥이나 왕겨의 악취

저감 능력이 뛰어나지 않아 악취로 인한 민원이 자주 발생되고 있으며, 농가에서는 악취 관리를 위하여 미생물 등에 기반한 환경개선제를 사용하는 등 악취 저감을 위하여 상당한 경비를 지출하고 있는 실정임.

- 또한 톱밥대용으로 사용되고 있는 왕겨는 톱밥에 비해 수분흡수율이 1/3수준으로 낮아 왕겨를 가공하여 수분조절제로 이용하고 있으나, 이 과정에서 비용이 증가하게 되고 계절적 영향으로 인하여 일일 배출되는 가축분뇨를 퇴비화하기 위해서는 제한적임. 추가적으로 깔짚 소재인 왕겨의 수급이 원활하지 않은데다, 가격이 불안정한 상황임.
- 최근 바이오차(biochar)는 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 악취 저감에 효과적인 물질로 보고되었으며, 바닥재가 혼입된 퇴비의 품질 또한 우수하다고 보고되었음. 바이오차는 비표면적이 넓은 다공성 구조로 이루어져 있어서 깔짚으로서의 수분조절능력이 매우 우수하고, 퇴비 더미 내부에 산소의 공급을 원활히 하여 호기성 미생물에 의한 발효를 가속화 하여 고품질의 퇴비를 단시간 내에 제조할 수 있을 것으로 판단됨.
- 유럽은 2015년 이후 농업용 바닥재 사용이 크게 증가하였고, 2020년부터 바이오차의 농업 및 산업 사용이 더 가속화 되었음. 농업에서의 활용 분야는 토양 개량제, 퇴비화 첨가제, 깔짚, 사료 첨가제 등 그 사용범위는 다양함.
- 2013년에는 바이오차 인증서가 도입되었고, 이는 유럽에서 자발적인 산업표준이고, 스위스에서는 농업용으로 판매되는 모든 바닥재에 대해 인증서 발급을 의무화하고 있음. 이 가이드라인은 지속적으로 업데이트되어 현재 2022년 최신 가이드라인이 있음.
- 이 유럽 바이오차 인증서 가이드라인에서는 바이오차의 사용용도에 따른 원료 허용기준, 바닥재 품질기준, 평가방법을 제시하고 있고, 이에 따른 평가를 통해 바이오차별 적정한 적용등급에 대한 인증서를 발급하고 있음. 농업과 축산업에서 바이오차는 순수한 형태가 아닌 토양 개량제, 비료, 깔짚 재료, 사료, 혐기성 소화 첨가제와 같은 가공제품으로 사용됨. 이 외에도 일본, 독일, 미국 등 다수의 국가에서 바이오차를 농업 및 식물의 비료로 사용하고 있음
- 국내에서도 농축산분야에서 고비용의 복잡한 공정을 통한 악취제거 방법을 더욱 단순화하고 효과적인 악취제거 방법을 확립하기 위하여 대체 깔짚 연구의 일환으로 피트모스, 코코 피트 및 바닥재를 깔짚으로 활용하는 연구가 몇몇 연구자에 의해 시도되고 있음.
- 또한 축산농가에서 지난 수십년간 깔짚으로 축사의 효율적 운영 이외에 안정적인 완숙퇴비를 만드는데 많은 시간과 경제적인 문제가 발생하므로 부숙화 효율을 고려한 새로운 깔짚 소재 개발이 절실히 요구됨에 따라 농림축산식품부는 바이오차를 이용한 새로운 깔짚소재 개발 연구과제를 발주하였고, 현재 경상국립대학교에서 이 과제를 수행하고 있음.
- 농림축산식품부의 연구용역 “바이오매스 전소발전소 발생 바이오차를 이용한 고기능성 축사바닥 발효깔짚 소재 개발 및 실용화”연차보고서와 국제저널 ELSEVER에 등재된 “Exploration of the potential capacity of fly ash and bottom ash derived from wood pellet-based thermal power plant for heavy metal removal” 논문에 의하면 바이오매스 전소발전소에서 발생하는 바닥재(Bottom ash) 즉, 목재펠릿 재의 경우 그 구조와 특성이 현행 목질계 biomass의 혐기적 열분해로부터 생산된 바이오차와 유사한 것으로 나타남.
- 바이오차는 생산 온도에 가장 큰 영향을 받는데, 온도가 낮을수록 낮은 탄소(C), 높은 산소(O)/탄소(C) 비율, 높은 수소(H)/탄소(C) 비율의 원소 함량 특성을 가짐. 이에 따라 높은 온도에서 만들어진 바이오차일수록 분해가 많이 되어 산소와 수소 함량(비율)이 줄어들고, 탄소의 함량(비율)이 증가함. 즉, 안정성이 높아지고, 기공이 증가하고, 표면적이 증가함. 따라서 높은 온도에서 생산된 바이오차일수록 탄소저장 효과가 높다고 할 수 있음.
- 특히 이 실험에 사용된 목재펠릿 재는 한국남동발전(주) 영동예코발전본부의 발전과정에서

나오는 부산물로 목재펠릿 재 생산과정에 추가적인 열이 필요없어 경제성을 확보하고 있으며, 최고등급의 목재펠릿을 사용하여 항상 동일한 성분의 균질한 목재펠릿 재를 생산할 수 있음.

Table 5-60. 한국남동발전(주)영동예코발전본부 목재펠릿 계약 현황

원산지	제조사	공급사(목재종류)	계약물량
국내	SY에너지	신영이앤피 (참나무, 느티나무, 활잡목 등)	190,000톤/년
	SEON ENTEC, AJU, KYUWON ENERGY	바이오매스협동조합 (소나무, 참나무 등)	25,000톤/년
해외	MC BIO, MJ AG, PT BERKAH	목포도시가스 (아카시아, 머란티, 고무나무 등)	110,000톤/년
	DAEHWA ENR	대화아이앤씨 (나왕, 열대활엽수 등)	50,000톤/년
	PHU TAI(베트남), SARARASA(인도네시아), GPS(말레이시아)	셀마크 (고무나무, 아카시아 등)	120,000톤/년
	LONG HAI PHAT(베트남), GREEN ENERGY(베트남), WWW RAINBOW(말레이시아)	GBT (아카시아, 고무나무, 소나무 등)	60,000톤/년
	PIO RESOURCES(말레이시아), PT HEXA MITRA(인도네시아), EASTWOOD(베트남), TSUNG CHANG(베트남), AN VIET NAM(베트남), GREEN ENERGY(베트남)	G-BIOTECH (아카시아, 고무나무, 소나무 등)	60,000톤/년
	PT PARAWOOD(태국), BE GREEN BIOMASS(말레이시아), VIET NAM SUPPLY(베트남), EASTWOOD(베트남), HUI HUANG TIMBER(말레이시아)	MK SOLAR (아카시아, 고무나무, 소나무 등)	120,000톤/년

- 따라서 국가 자원순환법과 환경오염예방 및 자원 활용, 효과적인 새로운 깔짚의 개발을 위해서 목재펠릿 재의 재활용은 시급한 과제임.

□ 대상폐기물의 발생·처리현황 및 대상폐기물의 재활용 필요성

- 최근 국내에서는 미세먼지 저감정책에 따라 노후석탄화력을 목재펠릿 전소발전소로 연료전환하고 있음. 한국남동발전(주) 영동예코발전본부는 1호기 1972년부터 2016년 6월까지, 2호기 1979년부터 2018년 10월까지 석탄으로 발전하였으나 1호기 2017년 06월, 2호기 2020년 09월부터 연료전환하여 1호기, 2호기 발전소를 운영하며 목재펠릿 재 발생량이 지속적으로 증가하고 있음.

Table 5-61. 최근 6년간 목재펠릿 바닥재 발생현황

[단위 : 톤]

구분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년
연(年)발생량	12,402	9,511	9,235	7,798	11,527	6,717
일(日)발생량	34.0	26.1	25.3	21.4	31.6	18.4
증가율	-	21.5%	-2.9%	-15.6%	47.8%	-47.2%

- 한국남동발전(주) 영동예코발전본부 1호기와 2호기의 목재펠릿의 사용으로 발생하는 목재펠릿 재의 1일 발생량은 평균 26톤으로 발전량이 증가함에 따라 목재펠릿 재 발생량은 증가될 것으로 예측되나 대부분 매립되고 있는 실정임.

Table 5-62. 최근 6년간 목재펠릿 재(biochar) 처리현황

[단위 : 톤]

구분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년
발생량	12,402	9,511	9,235	7,798	11,527	12,413
매립량	12,402	9,511	9,235	7,798	10,937	11,216
(비율)	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	94.9%	91.3%
재활량	-	-	-	-	589.9	1,082
(비율)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.1%	8.7%

- 결국, 한국남동발전(주) 영동예코발전본부는 전소발전소에서 발생하는 바닥재 발생량의 대부분을 매립(5년 평균 98.7%)하고 있음. 목재펠릿 재의 효율적인 활용과 자원순환정책 적극이행을 위해, 목재펠릿 재의 미래 발생량 증가(2017년 대비 2021년 47.2% 증가)를 고려한 재활용방안(깔짚, 비료 등)이 필요함.

□ 재활용제품 설명

- 재활용제품의 정의

- 목재펠릿 재를 축사 깔짚으로 재활용하고자 함. 여기서, 깔짚이란 동물 우리의 바닥에 까는 짚이나 톱밥을 의미하며, 목재펠릿 재를 재활용한 제품을 목재펠릿 재(발효)깔짚이라고 정의함.
- 일반적으로 깔짚 범위는 농림축산검역본부 고시 제2022-24호 「사료·사료원료·기구·깔짚 그 밖에 이에 준하는 물건의 범위」 [별표1] 에 근거한 기구, 깔짚에 준하는 물건은 동물과 함께 수입되는 용기, 깔짚 등임으로 포괄적으로 규정하고 있음.

Table 5-63. 농림축산검역본부 고시 중 깔짚의 범위

구분		품명
섬유질류	섬유질 사료	○ 목초, 산야초, 나뭇잎, 고간류(귀리짚, 밀짚, 벼짚, 보릿짚, 수수대, 옥수수대 등), 사료용 근채류, 풋베기사료작물(새싹보리, 수단그라스, 자운영, 청예갈대, 청예밀, 청예보리, 청예벼, 청예수수, 청예옥수수, 청예유채, 청예피, 청예호밀 등), 옥수수 속대 ※ 자연상태 그대로 또는 건조한 것, 단순 절단 또는 세절한 것
	섬유질 가공사료	○ 섬유질사료를 분쇄, 가열 등의 물리적 또는 화학적으로 처리한 것 ※ 분쇄한 것, 펠릿, 큐브 및 그와 같은 모양의 것
단백질류		○ 어분(조류 및 포유동물 유래 단백질이 포함된 경우에 한함), 우모분, 제각분, 육분, 육골분, 혈분, 육가공부산물, 도축 및 가공도축부산물, 동물성단백질혼합사료, 수지박, 동물성발효사료, 계란분말, 육포
유지류		○ 우지, 돈지, 양지, 닭기름

2. 기구, 깔짚 및 그 밖에 이에 준하는 물건
가. 동물과 함께 수입되는 용기, 깔짚 등
 나. 소비

- 재활용 제품인 목재펠릿 재 (발효)깔짚은 한국남동발전(주) 영동예코발전본부의 목재펠릿 재 (BPP-BA)와 피트모스 등 원료와 혼합하여 제조된 깔짚을 의미함.
 - 재활용제품의 특성 및 용도
- 바이오차는 깔짚으로서의 기본 필수기능인 수분조절 능력과 사용 후 퇴비화된 완숙퇴비의 농업적 활용도를 높이는 다양한 소재 중 수분조절 능력이 뛰어나고 탄소격리효과와 악취 및 온실가스 저감과 토양개량능력이 우수함.
- 또한, 추가적으로 부숙율을 조절하기 위한 미생물제를 일반적인 수분조절제인 톱밥/왕겨/이탄 등과 바닥재를 혼합하여 가축분뇨 배설시 수분조절과 저온 퇴비화가 진행되는 새로운 패러다임의 고기능성 친환경 깔짚 소재로 최적임.
- 바이오차는 비표면적이 넓은 다공성 구조로 이루어져 있어서 깔짚으로서의 수분조절능력이 매우 우수하고, 퇴비 더미 내부에 산소의 공급을 원활히 하여 호기성 미생물에 의한 발효를 가속화 하여 고품질의 퇴비를 단시간 내에 제조할 수 있음.
- 퇴비화 효율을 높이기 위한 깔짚의 최적 혼합 비율은 무게비(W/W)로 피트모스 : 코코피트 : 그 밖의 연소잔재물 = 4.3:1.4:4.3를 바이오차 혼합깔짚으로 선정함.
- 경상국립대학교에서 수행하고 있는 농림축산식품부에서 발주한 ‘바이오차를 이용한 새로운 깔짚소재 개발 연구과제’에 의하면 바이오매스 전소발전소에서 발생하는 바닥재(Bottom ash)의 경우 그 구조와 특성이 현행 목질계 biomass의 혐기적 열분해로부터 생산된 바이오차와 유사한 것으로 나타남.
- 이 연구에서 바닥재는 한국남동발전(주) 영동예코발전본부의 발전소에서 목재펠릿이 연소된 후 보일러 호퍼 내 하부에 쌓인 것을 채취하여 사용하였음. 채취된 바닥재는 110 °C에서 24h 동안 dry oven에서 건조 후 사용하였음. [표 5]에서 BA가 한국남동발전(주) 영동예코발전본부 발전소에서 발생한 바닥재임.

- 바이오차는 목재펠릿을 열분해하여 제조하며 WB400 은 밀기울(WB:Wheat Bran) 을 400°C에서 승온 2h 및 지속 2h 조건에서 제조한 바이오차이고, WB600은 밀기울(WB:Wheat Bran)을 600°C에서 승온 3h 및 지속 3h 조건에서 열분해 반응을 통해 제조한 바이오차임. 이 두 가지 바이오차는 열분해 후 충분히 냉방시킨 후 실험에 사용하였음.
- 한국남동발전(주) 영동예코발전본부의 바닥재와 바이오차를 상호 비교한 결과를 확인할 수 있음. 바닥재BA(Bottom Ash)는 바이오차 WB400보다 WB600과 유사한 비표면적을 보유하고 있는 것으로 판단됨. 즉 그 물리화학적 특성이 바이오차와 유사함을 확인할 수 있음.
- 바이오차는 생산 온도에 가장 큰 영향을 받는데, 온도가 낮을수록 낮은 탄소(C), 높은산소(O)/탄소(C) 비율, 높은 수소(H)/탄소(C) 비율의 원소 함량 특성을 가짐. 이에 따라 높은 온도에서 만들어진 바이오차일수록 분해가 많이 되어 산소와 수소 함량이 줄어들고, 탄소의 함량이 증가함. 즉, 안정성이 높아지고, 기공이 증가하고, 표면적이 증가함. 따라서 높은 온도에서 생산된 바이오차일수록 탄소저장 효과가 높다고 할 수 있음.
- 또한 발전소 목재펠릿 재와 바이오차 생산조건은 유사함을 알 수 있음.

Table 5-64. 발전소 목재펠릿 재와 바이오차 생산조건

구분	생산 온도(°C)	재료
발전소 목재펠릿 재	300~1100	목재펠릿
바이오차	300~800	목재 등 바이오매스

- * 바닥재의 경우는 열분해로 인해 형성되기에(보일러 하부에서 열분해) 바이오차로 할 수 있을 것이며 비산재의 경우는 바닥재라 할수 없음. (보일러 상부에서 연소로 인해 생성)
- 특히 이 실험에 사용된 목재펠릿 재는 한국남동발전(주) 영동예코발전본부의 발전과정에서 나오는 부산물로 목재펠릿 재 생산과정에 추가적인 열이 필요 없어 경제성을 확보하고 있으며, 최고등급의 목재펠릿을 사용하여 항상 동일한 성분의 균질한 목재펠릿 재를 생산할 수 있음이 확인됨.
- 국가 자원순환법과 환경오염예방 및 자원 활용, 효과적인 새로운 깔짚의 개발을 위해서 목재펠릿 재의 재활용은 시급한 과제임. 따라서, 한국남동발전 영동예코발전본부의 발전소에서 발생하는 목재펠릿 재를 활용하여, 발전과정에서 나오는 부산물인 만큼 경제성 확보와 안정적 완숙퇴비 만드는 데 시간을 크게 단축시키고, 대규모 안정적 공급이 가능한 새로운 깔짚으로 활용될 목적임.

□ 국내외 관련 산업현황 및 전망

- 우리나라의 경제가 성장과 국민소득이 높아지면서 축산물에 대한 수요가 단기간에 급격히 성장하였고, 이를 통해 축산업 규모도 커졌음. 이에 국민 1인당 1일 에너지 공급량에서 축산물이 차지하는 비중이 1970년 3.1%에서 2015년 14.8%로 크게 증가하였음.
- 최근 축산산업의 발달로 인하여 축사의 규모가 집약적 및 대규모화됨에 따라 사육두수는 21년도 기준 19,223만두로 최근 10년간 28.8%(4,178만두) 지속적으로 증가하고 있음.

Table 5-65. 축산농가의 축종별 사육두수 현황

[단위 : 천두]

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
한우	2,733	2,817	2,847	2,711	2,562	2,477	2,510	2,962	3,078	3,227	3,415
젖소	396	403	419	427	424	408	399	408	408	410	401
돼지	7,036	8,851	10,106	9,697	9,971	10,315	10,327	11,333	11,280	11,078	11,217
닭	140,282	142,697	139,732	151,837	163,016	167,228	141,381	172,993	172,920	178,528	177,194

출처; 통계청(2022)

- 이에 따라 가축분뇨 발생량 또한 최근 10년간 한우, 젖소, 돼지의 사육두수 증가율 (4.6%) 과 비슷하게 약 4%의 증가율을 보이며 해마다 약간씩 증가하고 있는 추세임.
- 축산분뇨는 유기질 및 무기질 비료 뿐만 아니라 작물 성장에 유익한 미생물들이 다량 함유되어져 있는 친환경적이며 가장 우수한 천연비료로 농작물 재배에 널리 사용되어져 왔음.
- 지난 수십년간 축산농가는 안정적 퇴비 제품을 생산하기 위한 수분조절제로 톱밥 및 왕겨를 주로 이용해 왔으며, 최근에는 목질계 폐기자원을 활용한 다양한 수분조절제의 활용이 시도되고 있음.

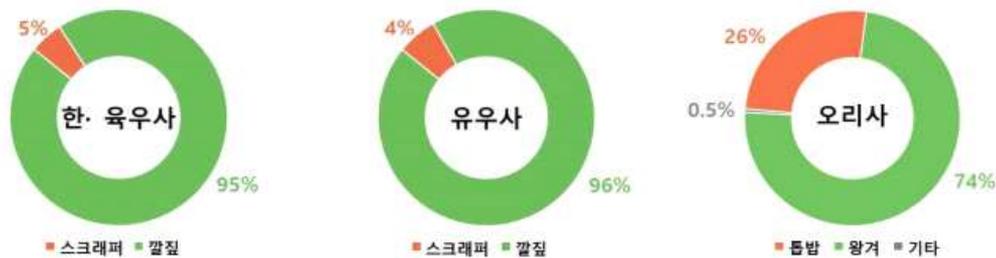


Fig. 5-53. 한우 및가금류 수분조절제 사용현황

- 국내 축사(우사)용 깔짚 자재 시장 규모는 2013년 추정치 기준 50만톤임(출처: 2011년, 농협중앙회 축산컨설팅부, '톱밥의 수급 및 전망'). 국내 수급은 매우 불안정하고 수분 흡수 품질도 불규칙하여 수입이 주로 유통되는데, 베트남 → 중국 → 러시아 → 인도네시아 순이며, 이미 낙농에서는 보편적으로 수입 톱밥을 사용하고 있으며, 가격과 수급 상황에 따라 대패밥과 MDF(Medium Density Fiberboard) 톱밥까지 사용하고 있음.

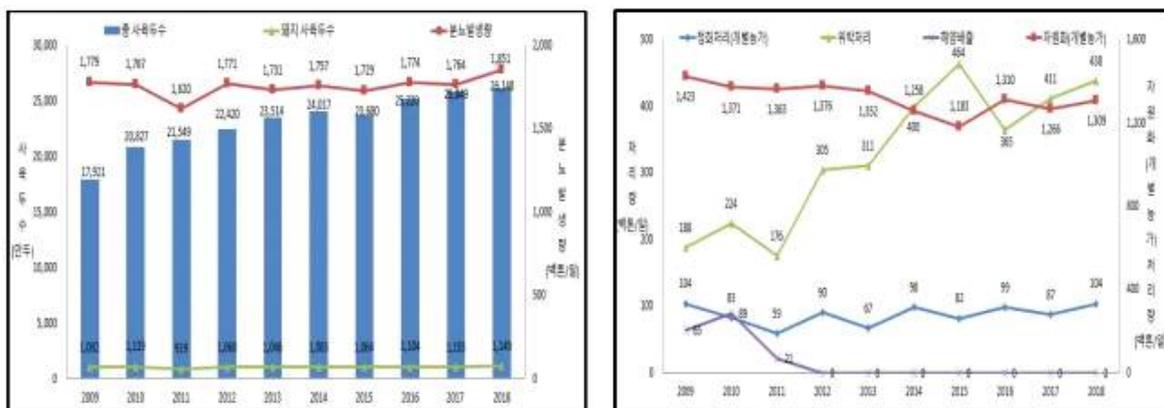


Fig. 5-54. 연도별 분뇨발생량 및 분뇨 처리방법

- 바닥 깔짚은 신선하고 오염되지 않은 것으로, 콘크리트 바닥의 경우 5cm 이상, 흙바닥인

경우 10cm 이상 두껍게 깔아줌. 깔짚의 구비 조건으로는 수분의 흡수력이 좋고 통기성이 좋으며 수분의 증발력이 양호해야 하며 값이 싸고 구하기 쉬우며 먼지나 곰팡이 등에 오염되지 않아야 함.

- 바이오차는 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 및 악취 저감에 효과적인 물질로 보고되었으며, 바닥재가 혼입된 퇴비의 품질 또한 우수하다고 보고되었음.
- 농림축산식품부의 통계에 따르면 가축분뇨량은 2017년 약 4,846만톤에서 2020년 5,194만톤까지 증가했으며 축산악취 민원 또한 2014년 2,838건에서 2020년 14,345건까지 증가했음. 축산업이 꾸준히 성장하면서 가축분뇨와 악취 등으로 인한 사회적 비용과 민원도 덩달아 크게 증가했음. 따라서 축산업에 대한 부정적인 인식이 커지는 만큼 환경친화적 축산업의 전환은 불가피한 상황임.



Fig. 5-55. 가축분뇨량 및 축산 악취 민원

- 문제를 인식한 농림축산식품부는 2030년까지 가축분 450만톤을 바이오차, 고체연료 등으로 전환할 계획을 밝혔으며 이를 위해 다양한 관계부처가 협력하는 사업단까지 출범했음. 해당 사업의 일환으로 퇴비로만 활용했던 고체분의 처리를 2030년까지 바이오차 등 비농업계 처리로 8%까지 확대한다고 함. 2021년부터 공동자원화시설 및 마을형 공동퇴비장에 고체연료와 바이오차 제조를 위한 시범사업을 진행하고, 탄소감축량 및 경제성 등을 평가하게 됨. 농업기술진흥원이 밝힌 자료에 따르면 가축분뇨 바이오차 1톤을 생산하면 약 2톤 정도의 CO₂eq 온실가스를 감축할 수 있다고 함.
- 국내에서는 농축산분야의 고비용이며 복잡한 공정을 통한 악취제거 방법을 더욱 단순화하고 효과적인 악취제거 방법을 확립하기 위하여 대체 깔짚 연구의 일환으로 피트모스, 코코피트 및 바이오차를 깔짚으로 활용하는 연구가 몇몇 연구자에 의해 시도되고 있음.
- 이 외에도 바이오차는 탄소 뿐 아니라 기후변화에 더 많은 영향을 주는 아산화질소와 메탄의 배출량도 함께 줄일 수 있어 바닥재에 대한 연구와 산업은 더 확대될 것으로 예상됨.

- 국외 관련 산업현황 및 전망

- 바이오차를 온실가스 배출 및 지구온난화 감소, 토양 개선, 농업 생산성 증가에 영향을 줄 수 있는 부가가치 제품으로 인식하고 축산업과 농업이외 다양한 분야에 적용하는 연구를 수행중에 있음. 바닥재의 물리적 및 화학적 특성은 축산업의 흡착, 촉매작용, 토양개선, 팽창제 및 깔짚 재료를 포함한 다양한 응용 분야에서 큰 역할을 함.

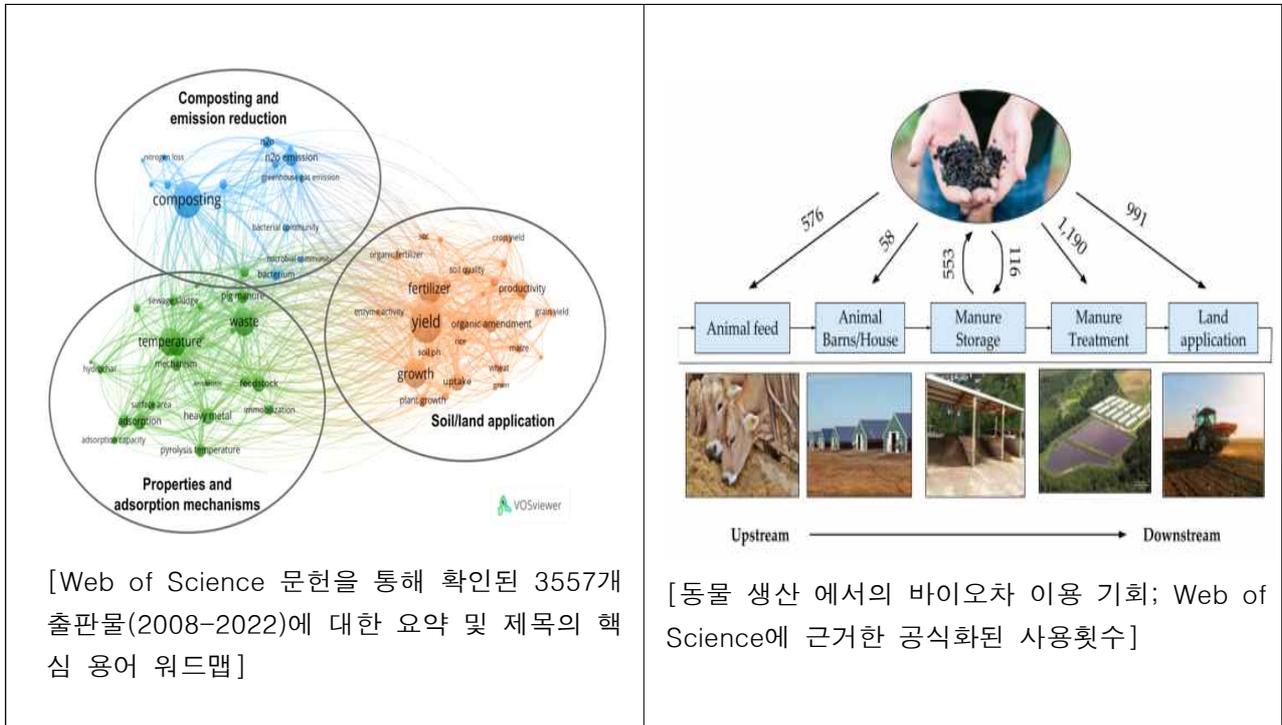


Fig. 5-56. 바이오차 관련 문헌 워드맵

- 바이오차 응용 분야에 전념하는 많은 연구가 있으며, 바이오차 사용을 축산업과 농업에 연결하는 데 관심이 커지고 있음. 현재 지속 가능성 목표를 지원하기 위해 조사한 결과 바이오차는 분뇨에서 다양한 유기 및 무기 화합물을 포획하는 데 효과적인 것으로 입증되었음.
- 가능성이 무궁무진한 바이오차의 활용도를 높이기 위해 향후 더 넓은 범위의 배출에 대한 친화도를 향상시키거나 특정 오염 물질의 흡착을 최적화하기 위해 증기 활성화 또는 산/염기 변형과 같은 바닥재 변형 가능성에 대한 연구가 시도됨.

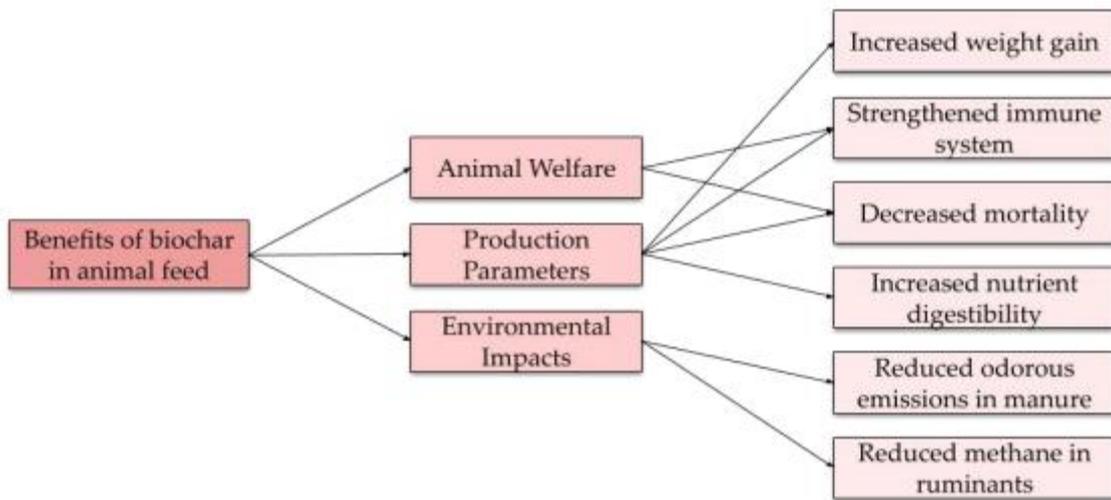


Fig. 5-57. 동물사료 첨가제로서의 바이오차의 장점

- 바이오차의 치료 효과에 대한 연구로는 수세기 동안 동물의 급성 치료에 사용되어왔고, 2010년 이후 축산농가들이 동물의 건강을 증진시키고 영양소 섭취 효율을 높여 생산성을 높이기 위해 바이오차를 정규 사료보충제로 활용하는 사례가 늘고 있음. 이 논문은 사료 첨가제로 바이오차를 사용하는 것이 동물 건강, 사료 효율성 및 가축 주거 환경을 개선하

고, 영양소 손실과 온실가스 배출을 감소시키며, 결국 토양에 적용될 때 토양 유기물 함량과 따라서 토양 비옥도를 증가시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 보여줌.

- 바이오매스 공급원료를 통한 바이오차 생산은 여러 탄소 포집 및 저장(CCS) 방법 중 가장 간단하고 저렴한 방법 중 하나임. 바이오차의 생산은 지난 10년 동안 매년 3%이 꾸준한 성장으로 전 세계적으로 상당한 추진력을 얻고 있음. 캐나다 온타리오주의 경우 특히 농업 및 임업에서 바이오매스 기반 공급원료의 사용이 몇 년 동안 인기를 얻고 있음.
- 또한 유럽의 경우 2013년에 이미 바이오차의 인증서 가이드라인을 적용하여 그 원료에 따라 사용 범위를 규정하고 있으며 지속적으로 개선하여 2022년에 최신 업데이트 버전이 출시되었음. 바이오차 인증서 적용은 많은 유럽국가들로 확대되어 가고 있으며, 스위스의 경우 의무화하고 있음.
- 전 세계 바이오차 시장은 2018년에 약 13억 달러의 가치가 있었으며 2025년에는 그 가치가 3배가 될 것으로 예상됨.
- 유럽과 미국, 호주 등 해외 주요 국가에서는 바이오차를 토양 개질을 위한 개량제에서부터 사료 첨가제 및 축사 깔짚으로 활용해 농축산업에서 활용성을 확대하고 있음.
- 특히 유럽의 자발적 바이오차 인증제도인 EBC(European Biochar Certificate)의 경우 농축산업용을 판매되는 바닥재 제품에 대해 등급 분류 및 안정성 평가를 수행하고 있으며, 스위스의 경우 판매되는 모든 바이오차 제품에 대해 EBC 인증을 의무적으로 받도록 하고 있음.

Table 5-66. EBC Biochar 인증 규격

구분	설명
EBC-Feed	가축 사료용, EU 사료 규정에 대한 모든 사항 충족 필요
EBC-Agro Organic	농업 비료용, EU 비료 규정에 대한 사항 충족 및 유기농 조건 충족 필요
EBC-Agro	농업 비료용, EU 비료 규정에 대한 사항 충족 필요
EBC-Urban	도시 조경용, 지하수 및 작업 안전에 대한 인증
EBC - Consumer Materials	소비재의 원재료로 사용될 경우에 대한 인증(화분, 테이크아웃 커피잔 등)
EBC-Basic Materials	건축자재 및 도로건설 아스팔트 등 복합 재료로 사용될 경우에 대한 인증

□ 재활용환경성평가 대상여부 검토

- 폐기물 종류

- 영동에코발전본부 목재펠릿 재의 경우, ‘폐기물관리법 시행규칙[별표4]’ ‘폐기물의 종류별 세부분류에 근거하여 ’51-13-99 그 밖의 연소잔재물’ 에 해당함.

Table 5-67. 대상폐기물의 폐기물 종류

폐기물의 종류별 세부분류(제4조의2제1항 관련)			
2. 사업장일반폐기물의 세부분류 및 분류번호 ...(중략)...			
51-13 연소잔재물			
51-13-01 연탄재			
51-13-02 액체연료연소재			
51-13-03 석탄재			
51-13-99 그 밖의 연소잔재물			
분류번호	폐기물의 종류	재활용 유형	사전분석·확인 필요 여부
51-13-99	그 밖의 연소잔재물	R-3-1, R-3-2, R-4-7, R-10	해당 없음
		R-4-2, R-7-1, R-7-2, R-10	해당

- 폐기물 재활용유형

- 영동에너지발전본부의 목재펠릿 재의 경우 연소후 폐기물로 발생한 재를 습식 냉각하여 피트 모스, 코코피트를 혼합하여 깔짚으로 사용할 계획이기에 영동에너지발전본부에서 발생한 목재펠릿 재는 “폐기물관리법 시행규칙” [별표 4의2] 의 “폐기물의 재활용 유형 별 세부분류” R-4(제품을 제조하는 유형) 중 해당하는 유형이 없기에 새로운 유형에 해당함.

Table 5-68. 대상폐기물의 폐기물 재활용유형

폐기물의 재활용 유형별 세부분류 (제4조의2제2항 관련)	
1. 원형 그대로 또는 단순 수리·수선하여 재사용하는 유형(R-1, R-2)	
가. R-1: 원형 그대로 재사용(일정한 규격의 용기나 상자에 넣거나 포장하여 재사용하는 자에게 제공하는 경우를 포함한다)하는 유형	
1) R-1-1: 원형 그대로 본래의 용도로 재사용하는 유형	
2) R-1-2: 원형 그대로 본래의 용도와 다른 용도로 재사용하는 유형	
나. R-2: 단순 수리·수선, 세척하여 재사용하는 유형	
1) R-2-1: 단순 수리·수선, 세척을 통해 본래의 용도로 재사용 하는 유형	
2) R-2-2: 단순 수리·수선, 세척을 통해 본래와 다른 용도로 재사용하는 유형	
....(생략).....	
2. 고상(固狀)의 자원을 회수하거나 제품의 원료를 제조하는 유형 또는 제품을 제조하는 유형(R-3, R-4)	
나. R-4: 제품을 제조하는 유형	
1) R-4-1: 금속성 제품을 제조하는 유형	
2) R-4-2: 골재, 유리, 시멘트, 콘크리트 및 레미콘, 내화물, 요업제품, 각종 석제품 등 비금속광물제품이나 아스콘, 아스팔트, 고화제(固化劑: 고체화를 위한 첨가물) 등 기타 비금속광물제품을 제조하는 유형	
3) R-4-3: 펄프, 종이 및 종이제품을 제조하는 유형	
4) R-4-4: 고무, 섬유 및 플라스틱 등 수지류를 고무, 섬유 또는 합성수지 제품으로 제조하는 유형	
5) R-4-5: 목재성형제품, 톱밥, 성형탄 등 나무제품이나 활성탄, 흡착·흡수제를 제조하는 유형	
6) R-4-6: 재생유기용제, 재생윤활유 등 석유정제물을 제조하는 유형	
7) R-4-7: 유·무기성 화합물, 산화물 등의 화학물질이나 안료나 도료, 페인트, 착색제 등 화학제품을 제조하는 유형	
8) R-4-8: 동·식물성 유지나 비누 등 유지제품을 제조하는 유형	
9) R-4-9: 수처리제나 유기탄소원, 응집제 등 수질개선을 목적으로 하는 제품을 제조하는 유형	
10) R-4-10: 의약품을 제조하는 유형	

- 폐기물 재활용환경성평가 대상여부

- 목재펠릿 재의 경우, “폐기물 관리법 시행규칙 [별표 4]”의 그 밖의 연소잔재물, [별표4의 3]의 분류번호(51-13-99)의 “그 밖의 연소잔재물”의 재활용유형에 해당하지 않기에 재활용 환경성 평가 대상에 해당함.
- 또한, 목재펠릿 재를 이용하여 “토양이나 공유수면 등에 성토재·복토재·도로기층재·채움재 등으로 재활용하는 유형”처럼 토양이나 지하수 등 자연매체와 접촉하지 않고, 축사의 깔짚으로 재활용하므로, 비매체접촉형 환경성평가 대상임.

Table 5-69. 재활용 대상 범위

평가대상 범위	내용
비매체 접촉형 환경성 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 재활용폐기물이 「폐기물관리법 시행령」 제7조의3에 따른 재활용 금지 또는 제한 대상이 아닌 폐기물일 경우 • 토양이나 지하수 등의 자연매체와 접촉하지 않는 재활용 유형일 경우 ☞ 「폐기물관리법 시행규칙」 [별표 4의2] “폐기물의 재활용 유형별 세부분류” 중 “R-7” 유형(매체접촉형) 이외의 “R-1”부터 “R-6”까지 및 “R-8”부터 “R-10” 이 이에 해당됨 • 「폐기물관리법 시행규칙」 [별표 4의2] “폐기물의 재활용 유형별 세부분류” 중 어느 하나에도 해당하지 않는 경우 • 「폐기물관리법 시행규칙」 [별표 4의3] “폐기물의 종류별 재활용 가능 유형”에 해당되어 있지 않은 경우 • 「폐기물관리법 시행규칙」 [별표 5의3] “폐기물의 재활용 기준”과 다른 방법으로 재활용하고자 하는 경우
매체 접촉형 환경성 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 재활용폐기물이 「폐기물관리법 시행령」 제7조의3에 따른 재활용 금지 또는 제한대상이 아닌 폐기물일 경우 • 폐기물 또는 폐기물을 토양 등과 혼합하여 만든 물질을 토양·지하수 지표수 등에 접촉시켜 복토재·성토재·도로기층재 등으로 재활용하는 유형일 경우 ☞ 「폐기물관리법 시행규칙」 [별표 4의2] “폐기물의 재활용 유형별 세부분류”중 제4호의 “토양이나 공유수면 등에 성토재·복토재·도로기층재·채움재 등으로 재활용하는 유형”인 “R-7” 유형(매체접촉유형)만이 이에 해당됨 • 「폐기물관리법 시행규칙」 [별표 4의3] “폐기물의 종류별 재활용 가능유형”에 해당되어 있지 않은 경우 • 「폐기물관리법 시행규칙」 [별표 4의3] “폐기물의 종류별 재활용 가능유형”에 해당되나 「폐기물관리법 시행규칙」 제14조의5제1항에 해당하는 규모로 재활용하는 경우

㉔ 재활용 기대효과

□ 환경적 측면

- 한국남동발전(주) 영동예코발전본부의 목재펠릿 재는 앞에서 언급하였듯이 그 성분이 바이오차와 유사함. 이에 따라 기존에 매립하던 목재펠릿 재를 깔짚으로 재활용함에 따라 다음과 같은 환경적 효과를 기대할 수 있음.
- 폐기물 재활용
 - 한국남동발전(주) 영동예코발전본부의 목재펠릿 재를 깔짚으로 재활용함으로써 기존에 매립하던 매립량을 감소시킬 수 있음.
- 온실가스 감축
 - Lehmann은 바이오매스로부터 바이오에너지를 회수하는 방법은 탄소 중립적인데 반해 바이오차를 토양에 넣는 방법은 진정한 탄소 네거티브 방법임을 제안하였음. 바이오차는 기후변화대응, 토양개량, 에너지생산, 폐기물관리 측면에서 중요성을 내재하고 있음. 바이오차는 유기물과 달리 안정성이 뛰어나므로 토양에 투입하게 되면 분해가 거의 일어나지 않아 대기 중의 이산화탄소를 장기간 저장함으로써 기후변화 완화에 기여할 수 있는 친환경 물질임.
 - 바이오차의 경우 바이오매스에 저장되었던 이산화탄소가 열분해를 통해 바이오차의 형태로 남게 되고 이는 토양에 들어가더라도 100년 이상 보존될 수 있음. 바이오차의 일부가 분해되더라도 장기간 저장되는 탄소는 초기에 흡수된 이산화탄소의 약 20% 정도가 되며, 이는 탄소 네가티브라고 볼 수 있음. 즉, 대기중의 자유 이산화탄소가 바이오매스를 거쳐 바이오차의 형태로 토양속에서 오랜 기간동안 안정성을 유지하며 저장됨.
 - 바이오차는 수 천년 전부터 인류의 선조들이 토양을 개량하여 농작물을 효율적으로 생산하기 위해 오랫동안 사용해왔으나 최근 바이오차의 탄소 저감 원리를 발견하게 되었고 이를 적절하게 활용할 경우에 기후변화에 대응할 중요한 수단이 될 수 있다는 것을 알게 되었음. 점차 바이오차를 이산화탄소를 제거하는 실질적인 방법으로 전 세계적인 제도화와 노력이 진행되고 있고, 수많은 연구가 수행되고, 시장이 형성되고 있음.
- 축사 환경 개선 및 토양 품질 개선
 - 다량 영양소가 풍부한 바이오차는 폐기물에서 영양분을 재활용하고 토양 비옥도를 향상시키며 비료 소비를 줄여 지속가능한 농업에 기여할 수 있음. 최근 연구의 초점은 다량 영양소(질소[N], 인[P] 및 칼륨[K])가 풍부한 바닥재 비료의 다양한 생산 방법을 탐구하는 데 있음.

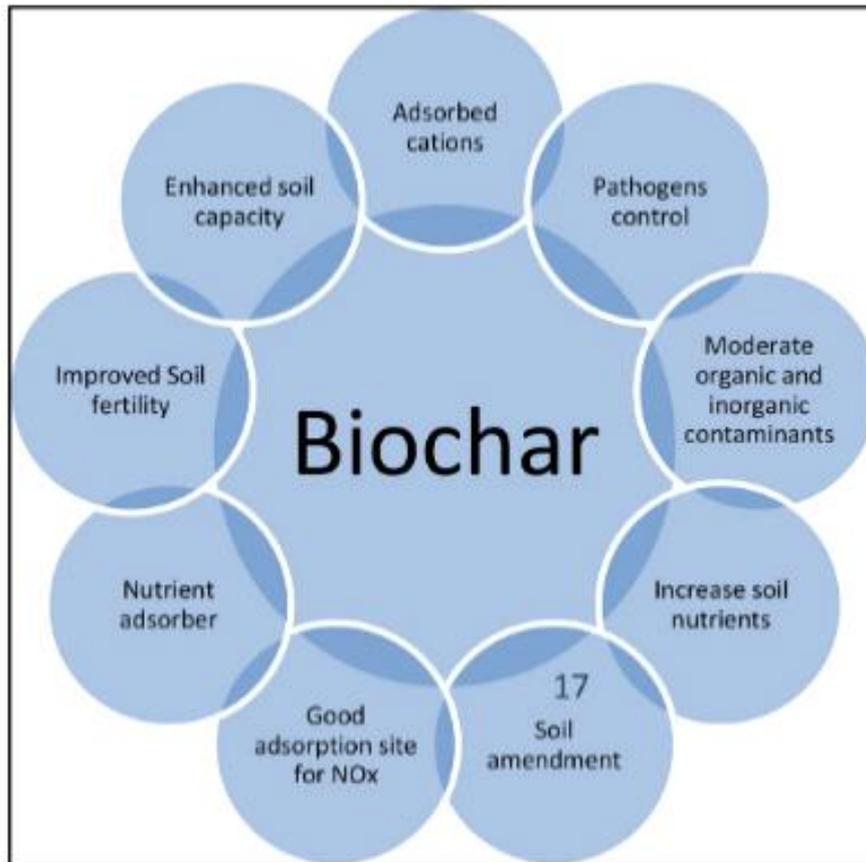


Fig. 5-58. 환경적측면의 바이오차 장점

출처: Babalola Aisosa OniOlubukola OziegbeObembe O. Olawole, 'Significance of biochar application to the environment and economy', Annal of Agricultural Sciences 64(2019)

- 바이오차를 가금류의 깔짚으로 사용함으로써 배설물에서 발생하는 암모니아 배출을 감소시키고, 수분관리가 개선되어 깔짚이 항상 건조하여 위생적임. 또한 깔짚의 수명이 연장되고 곤충 및 벌레 감소 및 바이오차가 탄소 및 질소를 증가시키고, 토양 미생물의 활성화 및 박테리아를 증가시킴으로써 깔짚으로 사용한 후 퇴비 및 비료로 사용하기에 효과적임. 추가적으로 바이오차는 낮은 열전도율로 인해 단열 및 보온성 기능이 우수하여 쾌적하고 포근한 깔짚 소재로 탁월함.
- 바이오차의 유익한 특성은 퇴비화되기 전에 비료 및 기타 농업 또는 도시 유기물질과 같은 폐기물 바이오매스로 되어질 때 크게 향상됨. 그 결과 유익한 미생물과 혼합되어 "controlled-release and stabilized" 식물 이용가능한 영양소로 변화됨.

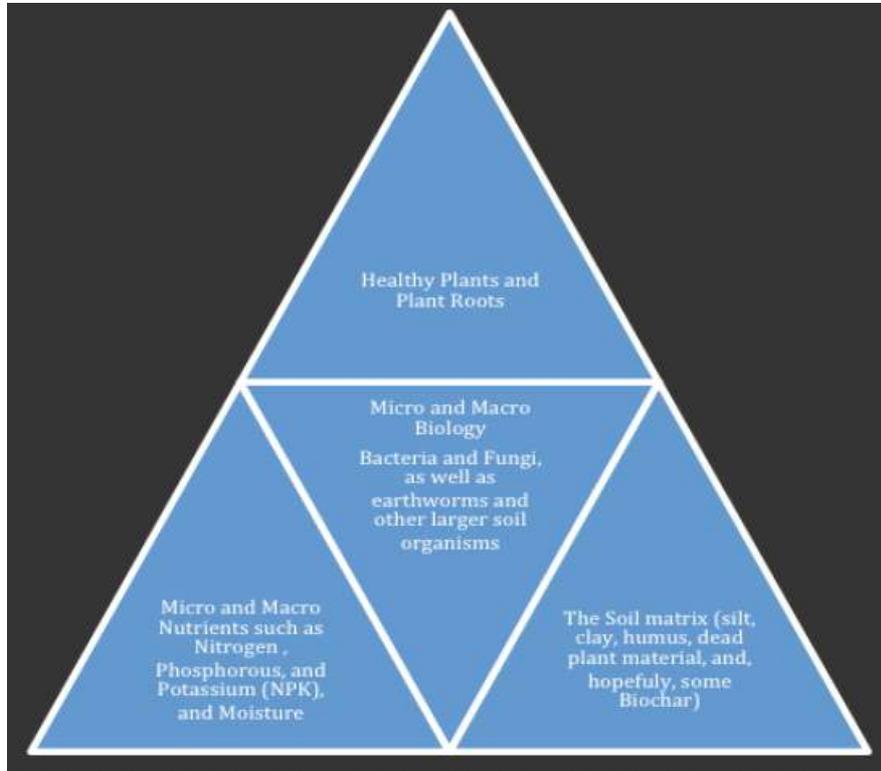


Fig. 5-59. 식물뿌리, 영양, 수분, 미생물학 및 토양의 관계]

출처: <https://www.airterra.ca/> 홈페이지

- Air Terra는 지난 6년 동안 캐나다 전역에서 소매 및 도매 수량의 바이오차를 판매해 왔음. 바이오차는 가축 깔짚으로 사용되고 악취와 GHG(Green House Gas) 배출을 줄이는 동시에 영양분이 많은 분뇨 퇴비를 생성함. 즉, 바이오차는 가축의 소변과 분뇨에서 영양분을 흡수하는 강력한 "스펀지" 역할을 함으로써 중요한 영양소가 유지되는 동시에 축사 냄새가 감소함을 확인함.
- 이 가축 깔짚을 제품화하기 전 테스트를 위해 Air Terra는 MGO Systems Inc.가 소유하고 운영하는 MiGO Ranch와 협력하여 앨버타주 Crossfield 근처에 새로 인수한 Hutterite Colony에서 이 실험을 시행하고 있음. MiGO Ranch는 바이오차를 가축 깔짚 성분으로 사용하는 테스트를 하고 있으며 바이오차와 함께 사용된 깔짚을 퇴비화하여 "복합 바이오차 및 분뇨" 제품을 생산할 예정임.
- ‘Effects of Sawdust, Peat Moss, Cocopeat, and Biochar on the Reduction of Specified Offensive Odor Substances in the Cattle Barn’의 국내 논문의 연구결과에 의하면, 우사에서 주민의 생활에 가장 큰 영향을 미치는 악취저감 효율결과는(바이오차 (70.7%) > 피트모스(62.2%) > 코코피트 (52.9%) > 톱밥 (29.2%)) 바이오차와 피트모스가 다른 깔짚에 비해 가장 효과적인 것으로 나타남.
- 폐기물 재활용, 축사 환경 개선을 통한 비용 절감, 비료화를 통한 토양의 품질개선 및 온실가스 배출 감소로 환경 개선을 통해 친환경적으로 기후위기와 축산업의 고질적인 환경문제까지 해결할 수 있는 바이오차야말로 지속가능한 축산업과 미래를 위한 열쇠가 될 것임.

□ 경제적 측면

◦ 재활용 사업자 측면

- 한국남동발전(주) 영동예코발전본부는 지금까지 매립해오던 목재펠릿 재를 바닥재 깔짚의 원료로 판매함에 따라서 매립비용 감소와 목재펠릿 재판매 수익을 창출할 수 있음.

Table 5-70. 폐기물 배출업체의 폐기물 처리비용 절감 경제성 평가

항목	내용	단위	비고
목재펠릿 재 발생량	23,606	톤/년	
목재펠릿 바닥재 발생량(A)	12,413	톤/년	A
폐기물 운반비용	자체매립시설에 매립하여 비용 없음	-	
폐기물 매립비용(B)	10,000	원/톤	B
평균 일 처리 비용	340,100	원/일	
평균 연간 처리비용(C)	124,133,800	원/년	C=A×B
평균 연간 깔짚 판매 시 매립바닥재 굴착 및 운반 비용(D)	1,422,554,626	원/년	D(부록 11)
실제 지출 합계(E)	1,546,688,426	원/년	E=C+D
깔짚 판매 수익(F) (50L 포대 깔짚, 공급원가: 5000원 기준)	4,355,438,596	원/년	F
깔짚 판매 이익(G)	2,808,750,170	원/년	G=F-E

- (주)케이아그로는 깔짚 원료 비용 절감을 통해 경제적 수익을 창출할 수 있음.

재료비 등원 원자재 수급상황, 국제원자재 가격(ex, 물류비, 피트모스, 코크피드)에 따라 유동적이며, 추후 상세가격 설정 시 반영이 필요함. 판매가를 260,000원으로 가정할 경우, 판매 수익은 10,210원/톤 임.

Table 5-71. 깔짚 재활용 사업자의 지출 내역

구분		상세내역	금액	비고
지출	야적장수거 및 운송원가	인건비	13,412원/톤	남동발전 운반비 물류내역 기준임
		보험료 등 기타 경비	3,570원/톤	
		일반관리비	1,359원/톤	
		운임	47,017원/톤	
		인건비	21,054원/톤	
		직접노무비 및 감가상각	15,362원/톤	
		일반관리비 등 기타비용	6,675원/톤	
	케이아그로 생산시설부분	재료비	111,400원/톤	발체 : < 2차년도 : 한우 및 가금용 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발 > 보고서
		직접 노무비	6,838원/톤	현장대리인 : 2023년 표준품셈 작업반장 단가적용 197,546/일, 총 3명
		보험료 등 기타 경비	2,300원/톤	-
		일반 관리비	802원/톤	노비비+기타경비의 8%적용
		물류비(투입장소 까지)	20,000원/톤	25ton 화물차 1회 운반비(50만원) 적용
	합계			249,789원/톤

Table 5-72. 깔짚 재활용 사업자의 경제성 평가

구분	일간(130톤/일)	일간(2,600톤/월)	일간(31,200톤/년)
지출	32,472,570원/일	649,451,400원/일	7,793,416,800원/일
	249,789원/톤 x 130톤/일	249,790원/톤 x 2,600톤/월	249,790원/톤 x 31,200톤/일
수익 (깔짚소재 판매)	1,327,430원/일	26,548,600원/일	318,583,200원/일
	10,210원/톤 x 130톤/일	10,210원/톤 x 2,600톤/월	10,210원/톤 x 31,200톤/일

* 펠렛 바닥재 : 31,200톤/년, 작업개월수 : 12개월/일 10대/1대 13톤/1개월 20일작업 기준으로 함(남동발전 영동예코발전본부 자료 발체)

○ 바이오차 깔짚 사용자 측면

- 톱밥의 경우 수분흡수능력이 우수하고, 다른 부자재에 비해 취급이 용이하고 초기 퇴비화 과정에서 악취 원인물질의 흡착과 같은 장점이 있으나 톱밥원료 대부분이 수입목에 의해 충당되고 있어 지역적으로 톱밥의 가격편중이 심한 상태로 경제성이 부족함.
- 톱밥대용으로 왕겨가 많이 사용되고 있으나 톱밥에 비해 수분흡수율이 1/3수준으로 낮아 왕겨를 가공하여 수분조절제도 이용하고 있으나, 이 과정에서 비용이 증가하게 되고 계절적 영향으로 인하여 일일 배출되는 가축분뇨를 퇴비화 하기 위해서는 제한적임.
- 바이오차의 경우 바이오매스에 저장되었던 이산화탄소가 열분해를 통해 바이오차의 형태로 남게 되고 이는 토양에 들어가더라도 100년 이상 보존될 수 있음. 바이오차의 일부가 분해되더라도 장기간 저장되는 탄소는 초기에 흡수된 이산화탄소의 약 20% 정도가 되며, 이는 탄소 네거티브라고 볼 수 있음. 즉, 대기중의 자유 이산화탄소가 바이오매스를 거쳐 바이오차의 형태로 토양속에서 오랜 기간동안 안정성을 유지하며 저장되는 것임.
- 이에 따라 바이오차 깔짚을 구매하는 축사의 경우 기존에 사용하던 톱밥과 왕겨 등의 깔짚이 가지고 있던 비싼 경제적 비용 부담과 퇴비화 과정에서 발생하던 악취 문제 및 추가 수분조절제 구매 등의 경제적 비용 부담이 감소함.
- Babalola Aisosa OniOlubukola OziegbeObembe O. Olawole, 'Significance of biochar application to the environment and economy', Annal of Agricultural Sciences 64(2019)에 의하면, 바이오차는 농업, 산업, 에너지 분야에서 사용할 수 있는 시장성 있는 제품임. 농업부문에서 바이오차의 사용은 토양의 개선과 수확량 증가의 효과를 볼 수 있으며, 비료와 비교하였을 때, 그 기능이 오래 지속되기에 비용 효율적임.

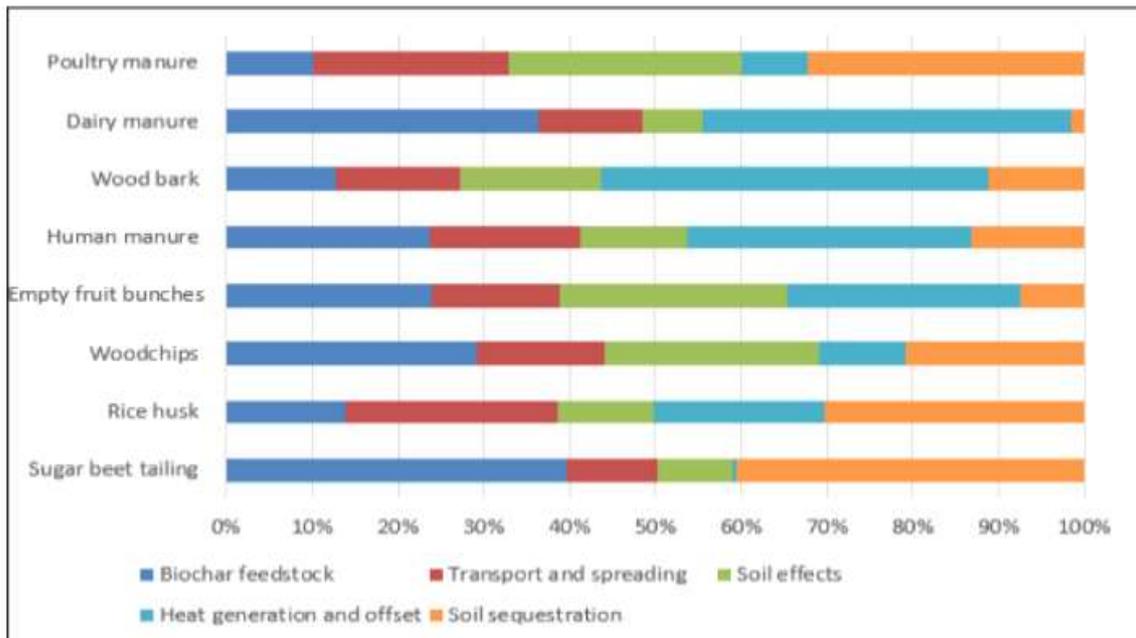


Fig. 5-60. 바이오차의 경제적 장점

출처: "Significance of biochar application to the environment and economy" Babalola Aisosa OniOlubukola OziegbeObembe O. Olawole, Annal of Agricultural Sciences 64(2019)

◦ 국가적 측면

- 매립량 감소로 인한 온실가스 감축 비용 절감

매립지에서 나오는 메탄은 20년간 이산화탄소보다 72배 더 강력한 온실효과를 발생시킴. 메탄 1 톤당 이산화탄소 72톤만큼 많은 열을 공기 중에 가둘 수 있음. 매립지는 메탄의 최고 공급원임.

- 바이오차 깔짚 사용으로 온실가스 감축 비용 절감

바이오차는 2019년 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)에서 탄소저장 효과를 인정받으며 앞으로의 기후 위기를 해결하는데 많은 역할을 할 것으로 주목받고 있음. 특히 2021년 정부가 발표한 '2050 국가 탄소중립 시나리오' 중 농업 분야 핵심기술로 선정되었음. 따라서 바이오차 깔짚 사용에 따라 온실가스 감축비용을 절감할 수 있음.

농업기술진흥원이 밝힌 자료에 따르면 가축분뇨 바이오차 1톤을 생산하면 약 2톤 정도의 CO₂eq(배출권 가격 27,400원/톤CO₂eq) 온실가스를 감축할 수 있음. 더구나 한국남동발전(주) 영동에너지발전본부의 폐기물로 나오는 바닥재는 생산비용이 절감되기에 그 경제적 가치는 더 높을 것임.

- 바이오차 깔짚 비료화를 통해 비료 사용량 감소로 인한 온실가스 감축 비용 절감

식량과 사료 증산을 위해 사용하는 비료가 온실효과를 초래해 지구 기온 상승을 억제하려는 파리 기후변화 협약의 목표 달성이 더 어려워질 수 있다는 연구 결과가 나왔음.

이탈리아 카를스루에공과대학(KIT)과 미국 오번대학 연구진은 이산화탄소(CO₂)와 메탄(CH₄)에 이은 제3의 온실가스인 아산화질소(N₂O)의 생성과 소멸을 광범위하게 분석해 얻은 결과를 과학 저널 '네이처'(Nature)에 발표했다.

KIT에 따르면 아산화질소로도 불리는 N₂O는 다양한 생성원을 갖고있으며, 이 중 인간 활동으로 배출되는 것은 농작물 재배에 투입되는 질소 비료에서 주로 나옴. 이때문에 증가하는 식량과 사료 수요를 맞추기 위해 질소 비료 사용량을 늘리면 대기로 유입되는 N₂O 배출량도 증가할 수밖에 없는 구조임. N₂O는 미량이지만 대기 중에 유입되면 약 120년을 존속하고 CO₂의 300배에 달하는 강력한 온실효과를 낼 수 있음.

이에 따라 바이오차 깔짚 사용 후 폐기된 깔짚의 비료의 사용량이 감소함에 따라 국가차원에서의 온실가스 감축비용을 절감할 수 있음.

② 대상폐기물 배출사업장 현황

㉠ 일반현황

□ 대상폐기물 배출사업장 정보

Table 5-73. 대상폐기물 배출사업장 상세정보

항 목	세 부 내 용		
배출사업장 법정명칭	한국남동발전(주) 영동예코발전본부		
업종	화력발전업(분류코드 : 35113)		
시설용량	325MWh		
주원료	목재펠릿		
제조공정	항목	공정	세부내용
	①	입고	트럭으로 목재펠릿 입고
	②	저장	목재펠릿 저장고에 저장(Shed형, Silo형)
	③	이송	벨트컨베이어로 목재펠릿 이송(1,700톤/일)
	④	분쇄	미분기로 목재펠릿 분쇄(1mm, 90%이상)
	⑤	고온연소*	미분된 목재펠릿 연소(연소온도 약 1,100℃)
	⑥	냉각	호퍼 내 목재펠릿 연소재 발생 및 담수로 냉각
	⑦	자가매립	회 처리장 매립
* 로내 탈황 여부 - 탈황설비 없음, 연료 외 투입물질(첨가제, 약품) 없음 - 탈질설비에 유입되는 암모니아는 보일러 내부가 아닌 보일러 출구 이후 단계이므로 바닥재에 혼입되지 않음			
주생산품	전력		
대상폐기물	51-13-99 그 밖의 연소잔재물		

□ 대상폐기물의 물리화학적 특성

Table 5-75. 목재펠릿 연소재의 이화학적 특성

구 분	목재펠릿 재	비료규격 (토양)	비료규격 (상토)	유기농업자재
pH (1:5)	9.2	-	4-7	-
EC (dS/m)	0.64	-	-	-
T-C (%)	22.91	-	-	-
T-N (%)	0.08	-	-	-
P ₂ O ₅ (%)	0.08	-	-	-
K ₂ O (%)	0.22	-	-	-
CaO (%)	0.48	-	-	-
MgO (%)	0.4	-	-	-
Na ₂ O (%)	0.24	-	-	-
Fe (mg/kg)	1,284	-	-	-
Mn (mg/kg)	339	-	-	-
As (mg/kg)	0.54	45 이하	25 이하	20 이하
Cd (mg/kg)	0.05	5 이하	4 이하	2 이하
Cr (mg/kg)	4.48	250 이하	5 이하(Cr ⁶⁺)	90 이하
Cu (mg/kg)	7.74	400 이하	150 이하	120 이하
Ni (mg/kg)	2.41	45 이하	100 이하	20 이하
Pb (mg/kg)	0.05	130 이하	200 이하	50 이하
Zn (mg/kg)	12.62	1,000 이하	300 이하	400 이하
B (mg/kg)	117	-	-	-
Mo (mg/kg)	0.61	-	-	-
Hg (mg/kg)	0.01	2 이하	4 이하	1 이하
염산불용해물 (%)	13.45	30이하	-	-
용적밀도 (g/cm ³)	0.33	-	-	-
공극률 (%)	87.5	-	-	-
수분 (%)	63.9	30이하	-	-
유기물 함량 (%)	26.2	-	-	-

출처 : 경상대학교 산학협력단(2020.05.19.분석결과)

근거 : 농촌진흥청고시 “비료의 품질검사방법 및 시료채취기준”제6조(이화학적 검사방법 등)

□ 대상폐기물 발생과정
- 대상폐기물 발생과정

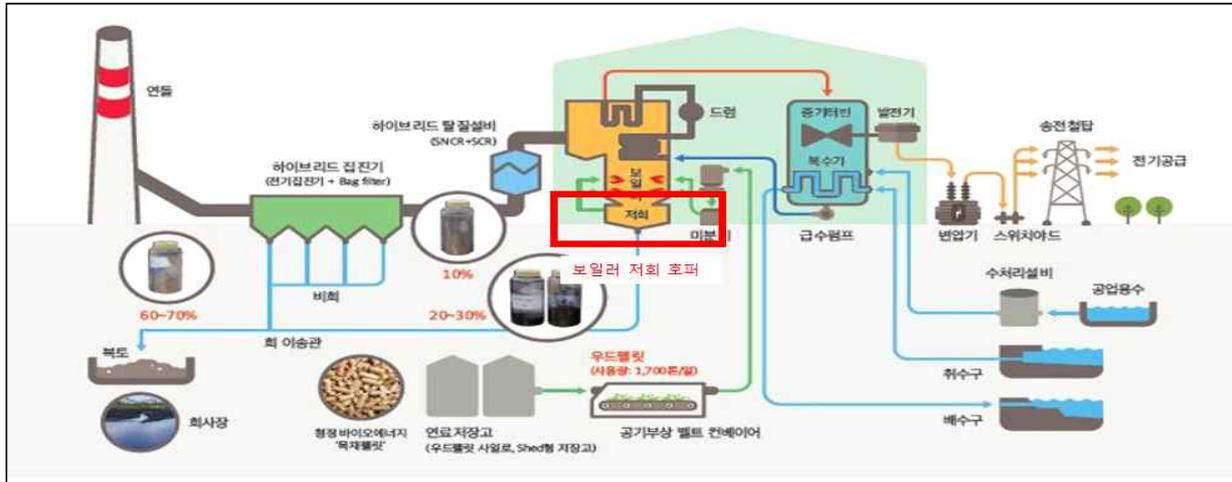


Fig. 5-61. 재활용 대상 폐기물 발생공정도

- 재활용 대상인 폐기물인 목재펠릿 (연소)재의 발생공정은 우선 1) 트럭을 통해 목재펠릿이 입고된 후, 2) 목재펠릿 저장고에 저장되며, 3) 벨트컨베이어로 이송(1,700톤/일) 후 4) 미분기로 목재펠릿을 분쇄 (1mm, 90% 이상)되며, 5) 미분된 목재펠릿은 고온연소(약 1,100℃)되어, 호퍼 내 목재펠릿 연소재가 발생되고, 6) 담수로 목재펠릿 연소재를 냉각하는 단계로 이루어짐.

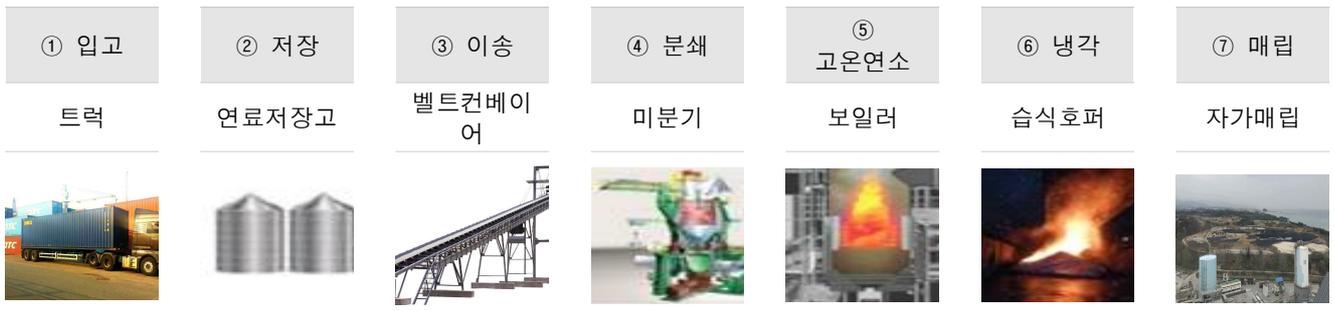


Fig. 5-62. 재활용 대상 폐기물 발생과정

Table 5-76. 재활용 대상 폐기물 발생공정

항목	공정	세부내용
①	입고	트럭으로 목재펠릿 입고
②	저장	목재펠릿 저장고에 저장(Shed형, Silo형)
③	이송	벨트컨베이어로 목재펠릿 이송(1,700톤/일)
④	분쇄	미분기로 목재펠릿 분쇄(1mm, 90%이상)
⑤	고온연소 ^{주1)}	미분된 목재펠릿 연소(연소온도 약 1,100℃)
⑥	냉각	호퍼 내 목재펠릿 연소재 발생 및 담수로 냉각
⑦	매립	자가 매립(회처리장 매립)

주1) 로내 탈황 여부

- 탈황설비 없음, 연료 외 투입물질(첨가제, 약품) 없음

- 탈질설비에 유입되는 암모니아는 보일러 내부가 아닌 보일러 출구 이후 단계이므로 바닥재에 혼입되지 않음



Fig. 5-63. 재활용 대상 폐기물

- 사용연료

- 사용연료는 목재펠릿으로 유해물질에 의해 오염되지 않은 목재를 압축 성형하여 생산하는 작은 원통모양의 표준화된 목질계 고체 바이오연료임.
- 목재펠릿은 침엽수와 활엽수 톱밥 등이나 이를 분쇄한 것, 산지개발과정에서 나온 부산물, 제재부산물 등 오염되지 않은 순수한 목재부산물을 원료로 함.
- 목재펠릿의 원료 계약 현황은 아래와 같음.

Table 5-77. 목재펠릿 원료 계약현황

원산지	계약물량(톤/년)
국내	125,000
해외	700,000

- 연료인 목재펠릿 사용량은 1호기 1,758톤/일, 2호기 2,794톤이며, 연간 사용량은 2018년 483,387톤에서 2021년 1,057,444톤임.

Table 5-78. 호기별 연료 사용량(일)

[단위 : 톤]

구분	일 사용량
1호기	1,758 톤
2호기	2,794 톤

Table 5-79. 최근 5년 연료사용량(연)

[단위 : 톤]

구분	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년
1호기	483,387	513,953	337,718	357,123	404,043
2호기	0	0	299,070	700,321	551,797
합계	483,387	513,953	636,789	1,057,444	955,840

- 한국남동발전(주)의 목재펠릿의 연료사용 규격은 “목재의 지속가능한 이용에 관한 법률 제 20조제1항”과 국립산림과학원고시 제2023-2호(목재제품의 규격과 품질기준)”을 참고함.

Table 5-80. 목재펠릿의 연료사용 규격

구분	단위	목재펠릿		바이오 고품연료제품	
		목재펠릿 품질기준 1~3급 주1)	남동발전 구매규격	Bio-SRF 품질기준 주2)	
모양 및 크기	직경	mm	6-8	6-8	50 이하
	길이		3.15~40 이하	32 이하	100 이하
수분	wt. %	10이하	10 이하	10 이하	
저위발열량	kcal/kg	-	3,900 이상	수입 3,150 이상 제조 3,000 이상	
회분	wt. %	1.5~5.0이하	3 이하	15 이하	
염소	wt. %	0.03~0.1 이하	0.05 이하	0.5 이하	
황분	wt. %	0.05 이하	0.05 이하	0.6 이하	
바이오매스	wt. %	-	-	95 이상	
금속 성분	수은(Hg)	mg/kg	0.1 이하	0.05 이하	0.6 이하
	카드뮴(Cd)		0.5 이하	0.5 이하	5.0 이하
	납(Pb)		10 이하	10 이하	100 이하
	비소(As)		1 이하	1 이하	5.0 이하
	크롬(Cr)		10 이하	10 이하	70.0 이하

주1) 목재펠릿 품질기준 : 국립산림과학원 제2023-2호

주2) Bio-SRF 품질기준 : 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 시행규칙 [별표 7]

- 목재펠릿의 연료품질 분석결과는 아래와 같음.



DARI

TEST REPORT

DAEDUCK ANALYTICAL RESEARCH INSTITUTE




Test Report Number	K19 12721 1	Test Method Used	Refer to test result
Received date	2019. 12. 26	Issued date	2020. 01. 03
Applicant	KOREA SOUTH-EAST POWER CO		

Sample Name	WOOD PELLET(Seal No.00553)
Sample Number	KOEN.YD-WOOD PELLET-2018-LT01-4 (BIO-4LOT)
Sampling No	DR-MKYD-191211
Supplier	MK SOLAR CO., LTD
Country of Origin	MALAYSIA
Manufacturer	BIO GREEN TECHNOLOGY SDN BHD
Analyzed date	2019. 12. 26 ~ 2020. 01. 03
Description	B/L NO. QNS003838 QUANTITY, 54 CONTAINERS (1,039,120.00 KGS)





Sample picture

Tested by Yim Ji-soo

Reviewed by Oh Mu-hyeok

*This laboratory is not accredited for the test result marked.

※ The above test certificate is the accredited test results by Korea Laboratory Accreditation Scheme, which signed the ILAC-MRA.

Certificated by President of DARI

DaeDuck Analytical Research Institute



COOPERATE NAME • Daeduck Analytical Research Institute • BUSINESS NUMBER • S14-B5-03405 • ADDRESS • N28-dong 291 KAIST Daehak-ro, Yusong-gu, Daejeon, South Korea • www.dari.kr

1. The results shown in this test report refer only to the sample(s) tested unless otherwise state.

2. This Test Report cannot be reproduced, except in full. The Test results are based on submitted samples which drawn by applicant

3. The authenticity of this results can be verified by +82 42-867-0019



1/2



DRSD-F-QP-14-02(0) DARI

Fig. 5-64. 목재펠릿의 연료품질 분석 결과

Test Report Number K19-12721-1

TEST RESULT

Item	Base	Unit	Determined value	Limit of Range	Test method
Diameter	-	mm	8	6 ~ 8	Notification No. 2018-8 by Korea Forest Research Institute
Length	-	mm	21	≤ 32	
Unit Volume Mass	ar	kg/m ³	640	600 ~ 750	
Total Moisture	ar	% wt	7.8	≤ 10	
Gross Calorific Value	d	MJ/kg (kcal/kg)	19.8 (4 740)	≥ 4 300	
Gross Calorific Value	ad	MJ/kg (kcal/kg)	19.4 (4 630)	≥ 4 200	
Gross Calorific Value	ar	MJ/kg (kcal/kg)	18.3 (4 370)	≥ 4 100	
Net Calorific Value	ar	MJ/kg (kcal/kg)	16.9 (4 030)	≥ 3 900	
Ash	ad	% wt	1.6	≤ 3.0	
Fines	ar	% wt	0.3	< 2.0	
Durability	ar	% wt	98.6	97.5 ~ 99	
Chlorine	ad	% wt	0.02	≤ 0.05	
Sulphur	ad	% wt	0.04	≤ 0.05	
Nitrogen	ad	% wt	0.2	≤ 0.3	
Ash Fusion Temperature, IDT (Reducing Atmosphere)	-	°C	1 197	≥ 1 150	
As (Arsenic)	d	mg/kg	< 0.5	≤ 1.0	
Cd (Cadmium)	d	mg/kg	< 0.1	≤ 0.5	
Cr (Chromium)	d	mg/kg	< 1	≤ 10	
Cu (Copper)	d	mg/kg	1	≤ 10	
Pb (Lead)	d	mg/kg	2	≤ 10	
Hg (Mercury)	d	mg/kg	< 0.01	≤ 0.05	
Ni (Nickel)	d	mg/kg	< 1	≤ 10	
Zn (Zinc)	d	mg/kg	8	≤ 80	
Other Substance	ar	% wt	< 2.0	< 2.0	
Particle Size, < 3.15 mm	-	% wt	99.2	≥ 99	ISO 17830:2016
Particle Size, < 2.0 mm	-	% wt	96.3	≥ 95	
Particle Size, < 1.0 mm	-	% wt	70.0	≥ 50	

Remark

ar: As received basis, ad: Air dried basis, d: Dried basis

-END-

OPERATE NAME • Daeduck Analytical Research Institute • BUSINESS NUMBER • 314-86-03465 • ADDRESS • N2B-dong 291 KAIST Daejeon-ro, Yuseong-gu, Daejeon, South Korea • www.dari.re.kr
 1. The results shown in this test report refer only to the sample(s) tested unless otherwise state.
 2. This Test Report cannot be reproduced, except in full. The Test results are based on submitted samples which drawn by applicant
 3. The authenticity of this results can be verified by +82 42-867-6019



Fig. 5-65. 목재펠릿의 연료품질 분석 결과

DARI | **TEST REPORT**
DAEDUCK ANALYTICAL RESEARCH INSTITUTE

Test Report Number: K19-12721-2

TEST RESULT

Item	Base	Unit	Determined value	Limit of Range	Test method
Fe (Iron)	d	mg/kg	276	≤ 500	ISO 16967:2015
DNA Test (Rice Husk)	-	-	Negative	Negative	Genetic Determination

Remark
ar: As received basis, ad: Air dried basis, d: Dried basis

-END-

Fig. 5-66. 목재펠릿의 연료품질 분석 결과

- 연료(목재펠릿) 품질관리 계획은 아래와 같음
 - 시료채취 시점 : 발전소 입고 전/입고 후 향차별 연료 분석 시행
 - 입고 전 : 원산지에서 연료 상차 전,
 - 입고 후 : 발전소 내 하역 후
 - 품질관리 방법 : 전문분석기관에서 시료채취 및 분석
 - 분석항목 : 29항목 성적서(TEST REPORT) 참고

□ 폐기물 발생량 및 처리현황

- 재활용 대상 폐기물 구분

- 재활용 대상 폐기물은 영동에너지발전본부에서 목재펠릿을 연소하고 발생하는 바닥재이며, 현재 폐기물분류는 “폐기물관리법 시행규칙”[별표 4]에 근거하여“그 밖의 연소잔재물(51-13-99)”에 해당함.

Table 5-81. 재활용 대상 폐기물과 폐기물 분류

구분	내용
재활용 대상 폐기물	목재펠릿을 연소하고 발생한 바닥재
폐기물분류	그 밖의 연소잔재물(51-13-99)

*목재펠릿 연소재 처리 방법 : 바닥재(발표갈집), 클링커(자가매립), 비산재(고화재로 재활용)

- 재활용 대상 폐기물 발생량 및 처리현황

- 재활용 대상 폐기물인 바닥재 발생량은 2017년 5,299톤에서 최근 2021년 6,916톤으로 증가하고 있으며, 비산재를 제외한 바닥재의 대다수는 매립장(영동에너지발전본부 내부 자체매립이 가능한 회처리장에 매립되고 일부(589톤)은 바닥재로 재활용되고 있음.

Table 5-82. 최근 5개년 대상폐기물 발생 및 처리 현황(2018~2022)

[단위 : 톤]

구분	2018			2019			2020		
	비산재	바닥재	클링커	비산재	바닥재	클링커	비산재	바닥재	클링커
발생량	3,816	5,706	3,804	3,739	5,540	3,694	6,513	4,678	3,119
재활용량	1,568	-	-	4,230	40	-	3,311	-	-
매립량	-	5,706	3,804	-	5,500	3,694	2,602	4,678	3,119
재활용률	11.8%			32.9%			23.1%		
구분	2021			2022					
	비산재	바닥재	클링커	비산재	바닥재	클링커			
발생량	11,684	6,916	4,610	11,193	12,413	-			
재활용량	9,081	589	-	7,454	1,082	-			
매립량	2,602	6,562	4,374	154.89	11,216	-			
재활용률	41.7%			36%					

※ 2018년도 비산재 : 재고량(발생량-재활용량) 전량 SILO보관으로 매립없음

※ 2019년도 비산재 : 2018도 SILO재고량까지 재활용하여 재활용량이 발생량 초과

※ 소숫점 이하는 절사

※ 목재펠릿 연소재 처리 방법 : 바닥재, 클링커(자가매립), 비산재(고화재로 재활용)

- 재활용 대상 폐기물인 목재펠릿 재(바닥재) 통상적인 발생량은 6,255톤/년으로 예측하고 있음.

Table 5-83. 재활용 대상 폐기물 연간 발생량

구분	발생량
1호기	2,421 톤/년 = 12.3톤/일 ^{주1)} × 365일/년 × 0.67 ^{주3)} × 0.8 ^{주4)}
2호기	3,834 톤/년 = 19.6톤/일 ^{주2)} × 365일/년 × 0.67 × 0.8
총 발생량	6,255 톤/년

- 주1) 1호기 일 발생량 = 1,758톤/일 × 1.4%(회분) × 50%(바닥재) = 12.3톤/일
 주2) 2호기 일 발생량 = 2,794톤/일 × 1.4%(회분) × 50%(바닥재) = 19.6톤/일
 주3) 이용률 67% ('17 ~ '21 5년 평균 이용률 적용, 계획예방정비공사 등 정비일수 제외)
 - 정의 : 일정기간동안 발전설비가 낼 수 있는 발전량 대비 실제발전량
 - 계산식 : {발전시간 × (발전전력량 - 소내소비전력량)} / (정격출력 × 8,760시간(1년))
 주4) 수거율 80% (클링커 제거, 정비작업 등 수거작업 불가일수 고려)
 - 정의 : 실제 발전 기간 중 재활용 대상 폐기물 수거 가능일수 비율
 - 재활용 대상 폐기물 수거불가 사유
 · 연소장애(클링커 제거) : 1회/3개월 _ 1회 당 3일~12일 소요
 · 재활용설비(탈수설비) 정비 : 일상점검, 월간점검, 정기정비 등 미가동일 발생
 · 재활용설비 주요부품 교체 : 제작사 주요부품 예상수명 2년으로 1회/2년 교체

Table 5-84. 1호기 설비 이용률

년월일	발전소	호기	발전시간 (HH:MM)	발전량 (kwh)	소내소비 전력량 (kwh)	송전량 (kwh)	열효율 (%)		소내 소비 전력률 (%)	역일 이용률 (%)
							발전	송전		
2017	영동	1	4029:45	438,791,600	43,236,749	406,174,904	32	30	10	79
2018	영동	1	7687:16	806,740,556	81,659,952	749,930,284	34	31	10	74
2019	영동	1	7831:11	842,293,740	89,616,330	787,144,390	32	30	11	77
2020	영동	1	4873:27	566,144,816	60,864,626	530,529,095	33	31	11	52
2021	영동	1	5,239:30	599,122,000	65,336,227	560,485,295	34	32	11	55

Table 5-85. 2호기 설비 이용률

년월일	발전소	호기	발전시간 (HH:MM)	발전량 (kwh)	소내소비 전력량 (kwh)	송전량 (kwh)	열효율 (%)		소내 소비 전력률 (%)	역일 이용률 (%)
							발전	송전		
2020	영동	2	3,264:43	560235500	48477277	398052278.4	38	35	8	82
2021	영동	2	7,512:37	1278483000	112952258	1162545691.8	37	33	9	85

- 실적 및 발생량 차이 근거
 - '17 ~ '19 미연분 60%, '20년 이후 설비개선으로 미연분 약 50% (미연분 60% → 50% 개선 시 바닥재발생량 30% 감소)
 - 실적산정 시 측정값(사용량), 분석값(수분 및 회분)적용하였으나, 발생량산정 시 설계값(사용량, 회분) 적용하여 차이 발생
 - 설계값

Table 5-86. 설비 설계값

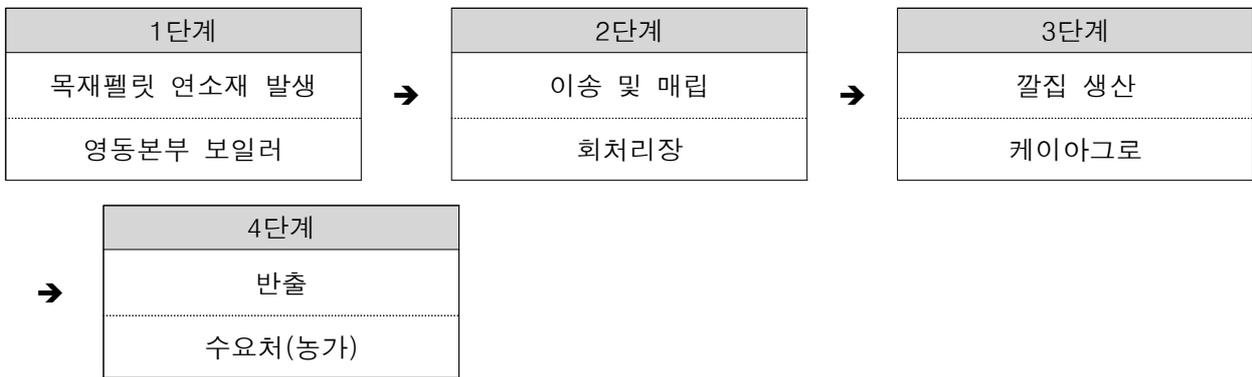
구분	설계값	비고
사용량	1,790톤/일 (74.621ton/hr × 24hr)	TMCR기준
회분	1.74%wt	최대 3%

* TMCR(Turbine Maximum Continuous Rating) :터빈 최대연속정격

□ 대상폐기물 및 재활용제품 운반·보관 계획

- 대상 폐기물 운반 보관 계획
- 회처리장에 매립된 바닥재를 덤프트럭과 굴삭기를 이용하여 굴착작업 및 저장함.
- 덮개로 밀폐 후 본부 세륜시설을 거쳐 이송함.

- 폐기물 이송방법 : 슬러리 형태로 밀폐 관로를 통해 소내 이송
- 처리 및 운반(반출) 계획



- 운반(반출)시 환경오염 방지대책

○ 대기환경보전법 시행규칙 [별표14]에 따른 비산먼지 관리기준 준수

<p>1. 해당 배출공정 : 수송</p> <p>2. 비산먼지 발생 억제를 위한 관리 기준</p> <ul style="list-style-type: none"> · 적재함을 최대한 밀폐할 수 있는 덮개를 설치하여 적재물이 외부에서 보이지 않고 흠림이 없도록 할 것 · 적재함 상단으로부터 5cm이하까지 적재물을 수평으로 적재할 것 · 수송차량은 세륜 및 측면 살수 후 운행하도록 할 것 · 먼지가 흠날리지 않도록 공사장안의 통행차량은 시속 20km이하로 운행할 것

○ 회처리장 매립구획 구분 관리 후 별도 포장 및 자연건조를 통해 완전탈수 상태로 반출하기 때문에 운반(반출)시 침출수 등 별도의 환경오염물질 발생 없음.

③ 재활용시설 운영 및 품질관리계획

㉠ 재활용제품의 성능확인

- 원료물질을 이용하여, 재활용 제품(축사깔짚소재)을 생산하는 케이아그로에서는 설비 소재지(창녕군 본초리 251-1)에 연구 및 품질 관리 연구소를 설립하여, 생산 단계에서 일관된 품질을 유지하도록 할 계획임. 또한, 주기적(월1회 또는 분기별)으로 외부 분석기관에 품질 검사를 실시하도록 함.

그리고 원재료(바닥재, 피트모스, 코코피트) 공급처를 단순화하여 원재료의 변경을 최소화하여 품질의 일관성을 높이도록 함.

재활용 제품으로의 기준은 다음 기준을 적용함

Table 5-87. 제품 기준

구분	As	Cd	Pb	Cu	Ni	Zn	Cr	Hg
	(mg/kg)							
자체 기준	2 이하	1 이하	10 이하	360 이하	45 이하	0.1 이하	100 이하	0.4 이하

*제품기준 평가항목은 농촌진흥청 고시 비료공정규격의 가축분 퇴비의 기준의 위해성평가 항목을 적용

Sn과F항목은 일반적으로 깔짚 유해 성분 분석에 해당 되지 않는 항목으로 제외

- 재활용 제품(바닥재 깔짚)의 경우 비료공정 시험법에 준하여 분석하고 기준은 농촌진흥청 고시 비료공정규격의 가축분 퇴비의 기준을 적용하여 평가함
- 바닥재를 활용한 재활용 제품(축사깔짚소재)의 원재료를 제품화하는 과정에는 물을 사용하는 공정은 별도 없으며, 제조공정주변의 청소 과정 중 일시적으로 발생하는 청소용수는 제조장 남측에 위치한 우수방지시설로 흘러들도록 설계될 것임.

(우수방지시설 : Later)

또한, 파쇄 및 보관과정 중에 발생하는 일상적인 비산먼지는 제조장내 설치된 집진설비등을 이용하여 제조장 외부로 배출되지 않도록 설계될 것임.

(집진시설 : Potable type, Cartridge 교체형, 1~2HP, 700~800ft³/min)

④ 재활용환경성평가 현장조사 관련 재활용공정 시연 계획

㉠ 시연계획

- 2023년 12월 재활용설비 설치공사 준공 예정으로 대체시설로 시연 예정

㉡ 대체시설 현황

- 회사명 : (주)인리치바이오
- 시설위치 : 경상북도 경산시 용성면 벚꽃길34-34
- 시설 현황(벨트컨베이어 및 포장설비)



Fig. 5-67. 시설 현황(배합기)

㉔ 재활용제품 납품업체 시연계획

- 납품업체 : 한성목장 (한우 농가/면적4,654m²/두수45마리)
- 주소 : 경상북도 성주군 용암면 문명2길105 한성목장

(다) 농민단체와 공동사업 추진

농민단체와 공동사업을 추진하기 위해 거창 축협과 깔짚 공급사업을 지원하고자 협력하고 있다. 깔짚 공급사업이 성공적으로 확산된다면 퇴비저장시설 부족, 악취로 인한 민원, 공동자원화시설운영의 한계, 축산농가의 퇴비사 부족문제 등을 해소하는 데 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

(라) 기업형 유통망 공략((주)하림)

가금류 산업의 대기업인 하림과의 협의를 통해 바이오차 혼합깔짚을 약 20평 규모의 하림 실험농장에 적용하여 실증 실험을 3차례 수행하였다. 추가적인 협의를 통해 500평 규모 (30,000수)의 하림 직영농장에서의 실증 시험을 계획 중에 있으며, 추후 하림과의 유통망을 구축할 예정이다.

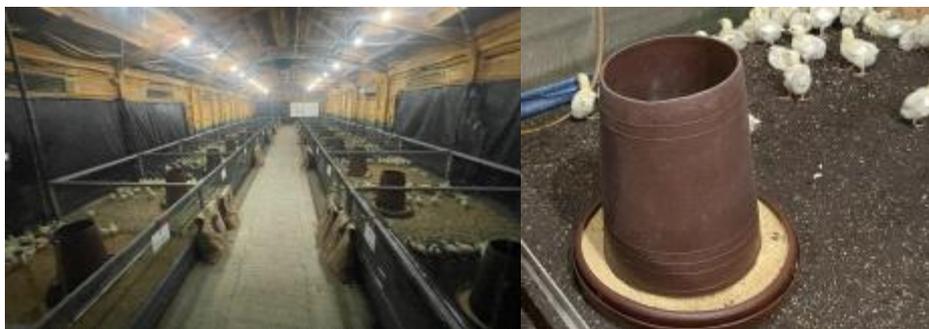


Fig. 5-68. 하림 실험농장 실증 시험 전경

(2) 개발된 축사바닥 깔짚 신소재의 유통 및 사업화 전략 구축

국내 축사(우사)용 깔짚 자재 시장규모는 2013년 추정치 기준 50 만톤이며, 국내 공급은 매우 불안정하고 수분 흡수 품질도 불규칙하여 수입이 주로 유통되는데, 베트남, 중국, 러시아 및 인도네시아 등에서 주로 수입되고 있다. 축산농가에서는 보편적으로 수입 톱밥을 사용하고 있으며, 가격과 수급 상황에 따라 대패밥과 MDF 톱밥까지 사용하고 있음. 최근 깔짚 재료에 대한 수요가 많아짐에 따라 국내산 알톱밥(침엽수, 활엽수 등)과 왕겨(벼알곡외피) 물론 수입산 깔짚재로 압축톱밥(침엽수, 활엽수 등 ; 중국, 동남아산), 펠릿(침엽수, 활엽수 등 ; 중국), 코코피트(코코넛섬유질 ; 동남아), 옥대펠릿(옥수수줄기 ; 중국), 콘코브(옥수수열매대 ; 중국)가 사용되고 있는 실정이다.

Table 5-88. 원료별 특성

구분	목재부산물			코코피트	옥대펠릿	Corn cob.	왕겨
	알톱밥	압축톱밥	펠릿				
원료	침엽수 활엽수 등	침엽수 활엽수 등	침엽수 활엽수 등	코코넛 섬유질	옥수수 줄기	옥수수 열매대	벼알곡 외피
주원산지	국산	중국, 동남아	중국	동남아	중국	중국	국산
함수율	35-45%	15%	10%	10%	10%	10%	14%
흡수정도 (알톱밥 기준)	100	130	140	290			45.7
전경							

(가) 국내외 주요 수요처 현황

- 국내 축분퇴비에 대한 주요 수요처는 각 퇴비회사의 대리점, 농업인, 영농조합법인, 지역농업협동조합, 지역축산업협동조합, 품목농업협동조합 및 업연초생산협동조합임.
- 부속유기질 기업 1개소당 중간 유통 거래 업소는 22개소 정도이며, 기 가운데 농협이 60%, 회사와 대리점이 37% 정도임. 일부 회사는 농업인들에게 직접 비료를 판매하고 있음.
- 해외에서는 일부 WALMART, HOMEDEPO 및 코스트코와 대형마트에 가축분을 포함한 다양한 퇴비가 공급하고 있으며, 최근 국내 코스트코에서 또한 조경용 퇴비를 판매하고 있음.
- 이와 같이 국내 축분퇴비의 공급은 농협에 대부분 의존하고 있는 실정임. 이에 친환경 퇴비 수요를 증가하기 위한 수요처를 더 확대할 필요가 있을 것으로 판단됨.
- 최근 대리점이나 중간유통 거래업체를 거치지 않고 온라인으로 퇴비의 공급이 가능하기 때문에 온라인 중점 수요처를 확대하는 것이 더 효과적일 것임.

(나) 국내외 경쟁기관 및 기술 현황

- 국내 가축분퇴비 생산업체는 776개이며, 국외 가축분 퇴비 생산업체는 정확한 통계자료가 없으나 국내여건을 고려할 때, 예측하기 어려울 정도로 많을 것으로 판단됨. 국내외 모든 가축분 퇴비 생산업체는 독자적인 기술을 이용하여 가축분 퇴비를 제조하고, 제조된 퇴비는 비료공정규격에 의거 적합성만 판단하여 출하하기 때문에 최종 제품이

품질규격에 적합하다는 것만 알 수 있을 뿐 그 기술력에 대한 정보를 얻기는 제한적임. 또한 국내외 가축분 퇴비생산업체의 제조기술 및 기술현황에 대한 조사가 부족하므로 그 기술들을 객관적으로 비교하기는 어려움.

(다) 표준화 전략

- 본 연구진은 연구개발을 통해 도출된 기술 및 제품들의 표준화 전략을 구축하기 위하여 우선 축사깔짚 및 퇴비에 대한 표준화 현황조사를 실시하고 본 연구에서 개발된 제품들의 표준화하기 위한 역량을 평가할 예정임. 그 후 깔짚 및 퇴비가 표준화 됨에 있어 문제시 되는 환경적인 요인과 SWOT 분석을 실시하여 표준화 추진 방향 및 전략을 수립할 예정임.



Fig. 5-69. 표준화 전략

- 본 연구에서 도출된 주요 기술 및 제품은 축사바닥 깔짚 소재와 그 소재가 적용된 퇴비와 관련된 것으로 앞서 언급된 표준화 역량, 환경분석 및 SWOT 분석을 실시하여 소재별 중단기 표준화 전략을 구축할 예정임. 특히 가축분 퇴비의 경우 이미 품질인증 규정 및 공정규격 설정되어 있으므로 본 연구에서 개발된 축사깔짚을 적용한 새로운 퇴비의 품질을 규격화하여 표준화할 수 있는 전략을 구축할 예정임.
- 축사 깔짚은 축사에 적용하기 위한 조건이 몇몇 연구자 및 기관보고서에 제시되어 있기는 하나 지역별, 축종별 및 규모별 깔짚 종류 및 사용방법은 차이가 있음. 이는 현재까지 가축 종류별 깔짚에 대한 명확한 표준화가 되어 있지 않다는 것을 나타내며, 본 연구에서 개발된 깔짚을 우선적으로 KS에 등록하는 것을 목표로 함.
- 이 목표를 달성하기 위해서는 우선 주관기관인 경상국립대는 악취저감효율, 깔짚사용기간, 부속도 촉진효과가 있는 깔짚제조 원천기술을 제공하고 공동연구기관인 케이아그로는 이전된 핵심기술을 기반으로 하여 제품을 제조생산 유통하고, 국가기관/영농단체/회사 등과 협업할 수 있는 네트워크를 구축하며, 타 제품과의 효율성을 비교하여 기존시장 및 신시장을 진입할 수 있는 경로를 개척할 것임.

(라) 사업화 전략

- 한국남동발전 영동예코발전본부 1, 2호기 연료전환(석탄→목재펠릿 전소) 후 연소과정에서 발생하는 미연분 연소재 (바이오차)의 매립으로 인한 회처리장 만지 현안을 해결하고자, 재활용환경성평가를 획득하여 깔짚으로 재활용하는 방향으로 산업화를 진행중에 있으며 전소발전소에서 배출되는 바이오차의 생산과 유통을 책임지고 있는 한국남동발전(주)와 (주)케이아그로가 본 과제에 참여하고 있어 바이오매스 전소발전소가 운영되는 한 장기적인 보급은 전혀 문제없음.

- 현재 시장개척 초기이기 때문에 본 제품의 다양한 접근보다는 본 연구의 초기 목표인 우사용과 계사용 깔짚에 집중하여 시장을 키울 계획이며, 이후 시장이 확대되면 다양한 접근과 사업 부분을 확장할 계획임.
- 본 연구를 통해 우사용과 계사용 바이오차 혼합깔짚 2종의 시제품을 생산하였으며, 산업화 초기에는 2개의 제품부터 시작하여 시장을 형성하는 사업화 전략을 우선적으로 적용할 계획임. 하지만 실제 농가 적용에 다양한 조성의 깔짚 배합이 필요할 수 있으므로, 향후 남부/중부지역과 더 나아가 강원도 지역 같은 환경적으로 상이한 조건에 따라 조성배합 비율의 차이를 둘 계획이며, 온도(동절기 및 하절기)와 습도(건기 및 우기)를 고려한 제품도 향후 깔짚시장이 커지면 출시할 계획임.

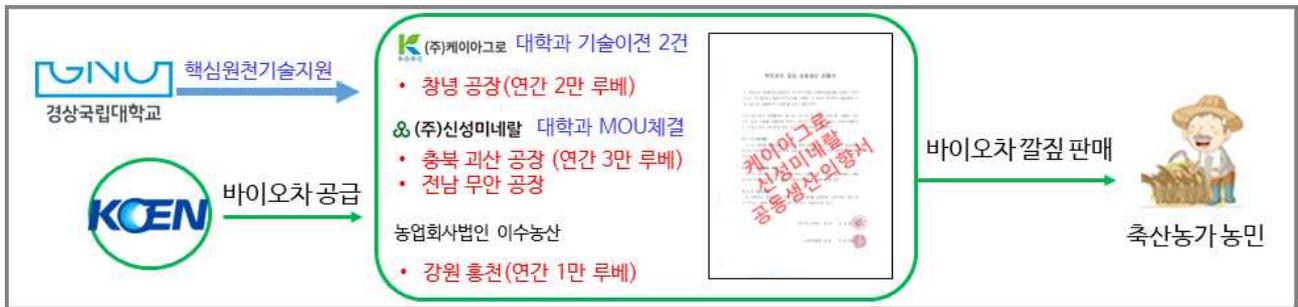


Fig. 5-70. 산업화 및 실용화 전략

(마) 투자 및 생산계획

- 본 연구를 통해 개발된 축사바닥 깔짚 소재와 퇴비사 연계를 위한 핵심기술을 산업화하기 위해 (주)케이아그로는 자체 예산을 들여 경남 창녕군 대지면에 3000평부지에 500평 규모의 깔짚 생산공장을 2023년 하반기부터 건설 중이며, 2024년 5-6월경 공사가 마무리되는데로 생산가동할 예정임.

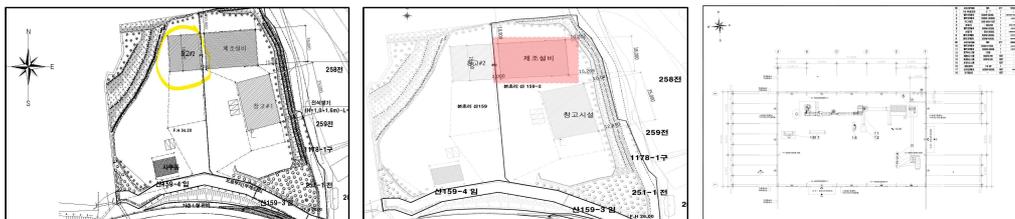


Fig. 5-71. (주)케이아그로 창녕 공장 도면

- 바이오차 깔짚의 생산은 (주)케이아그로의 경상남도 창녕 공장에서 연간 2만 루베, (주)신성미네랄의 충청북도 괴산 공장에서 연간 3만루베, 강원도 홍천에 위치한 농업회사법인 이수농산에서 연간 1만 루베를 생산할 계획이며, 케이아그로와 신성미네랄은 공동 생산 의향서를 작성하여 공동으로 생산하기 위한 계약을 체결하였음.

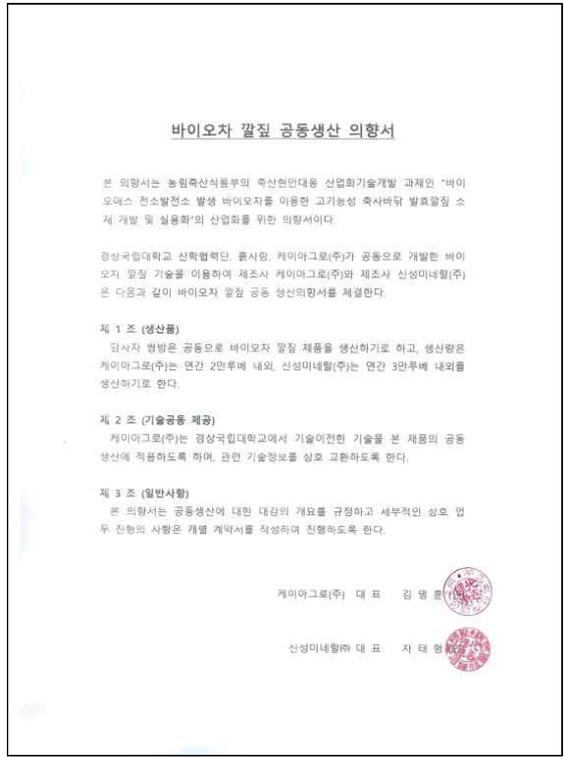


Fig. 5-72. 바이오차 깔짚 공동생산 의향서

- 바이오차 깔짚의 확대 방안은 (주)케이아그로(경상북도 대구, 경상남도 창원), (주)신성미네랄(충청북도 괴산, 전라남도 무안), 농업회사법인 이수농산(강원도 홍천)의 5개의 공장에서 깔짚을 생산하여 인근 농가에 판매하는 전략을 수립하고 있으며, 이를 통해 전국에 바이오차 깔짚을 보급하여 매출액을 달성할 수 있을 것임.

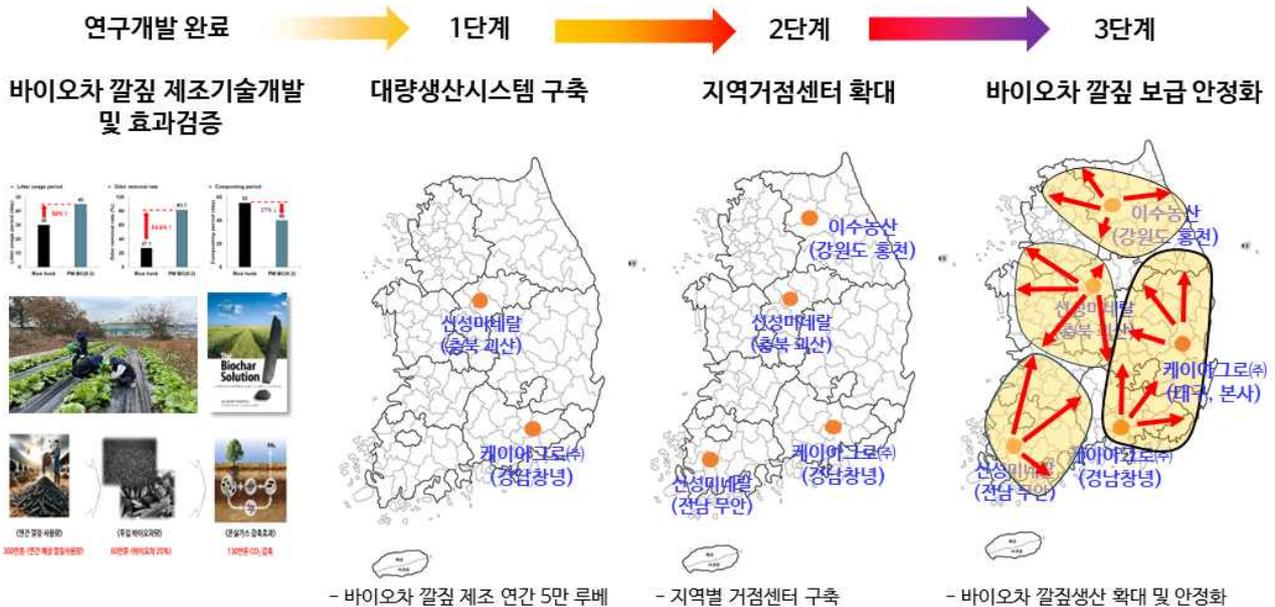


Fig. 5-73. 바이오차 깔짚 확대 방안

(3) 개발된 축사바닥 깔짚의 탄소중립 효과

(가) 탄소중립 배경

- ① 지구온난화로 인한 전 세계적 탄소중립 배경
- 지구온난화는 지표 부근의 대기와 바다의 평균온도가 장기적으로 상승하는 현상으로 최근 들어 수십 년에 걸쳐 진행되고 있으며 앞으로도 꾸준히 높아질 것으로 예측되어 많은 과학자들은 이러한 지구온난화가 인류의 멸망을 초래할 것이라고 경고하고 있음.
- 지구 표면의 온도상승은 해수면 상승을 초래하고, 이는 다시 강수량의 양과 패턴을 변화시켜, 가뭄 및 홍수 등의 기상이변을 일으키게 되고 빙하의 후퇴와 기후의 변화는 생태계를 변화시키는 등 인류를 포함한 지구상 생물의 생존도 위협받고 있는 실정임.

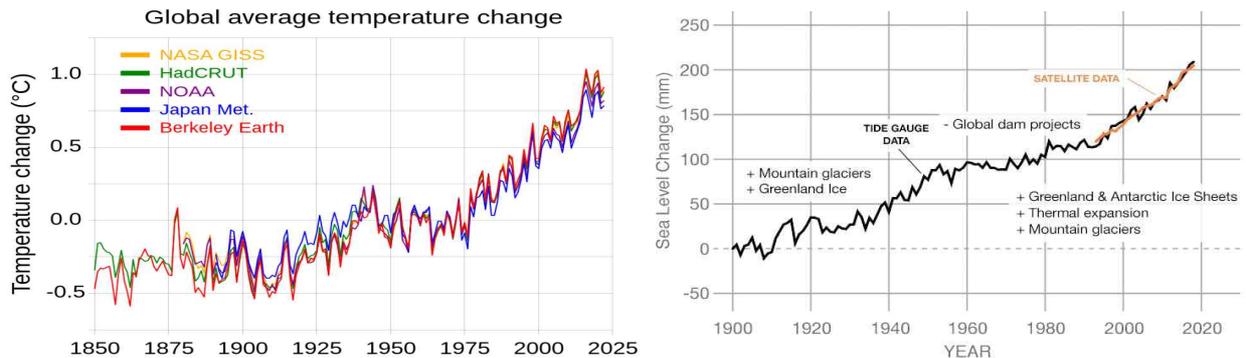


Fig. 5-74. 지구온난화 현상으로 인한 기온변화 및 해수면 변화

- 지구온난화의 주요 원인으로서는 인간 활동으로 인한 대기 중의 이산화탄소 (CO₂), 아산화질소 (N₂O), 메탄 (CH₄), 수소화플루오르화탄소 (HFC), 과플루오르화탄소 (PFC) 및 육플루오르화황 (SF₆) 등 온실가스의 농도 증가가 주된 원인으로 주목받고 있으며 (교토의정서, 2007), 특히 지구온난화는 이산화탄소 (CO₂), 아산화질소 (N₂O) 및 메탄 (CH₄)이 주요한 원인으로 보고되었음 (IPCC, 2001).
- 2007년의 일본 기상청 발표에 의하면, 한반도 부근 바다의 수온이 최근 100년간 세계 평균 바다 수온상승 온도인 0.7°C의 2배에 해당되는 1.2~1.6°C정도 상승한 것으로 발표되었고, 환경부의 발표에 의하면 1967년부터 1997년까지 지난 30년간 동해는 0.62°C, 남해는 0.61°C 및 서해는 0.88°C 상승한 것으로 보고되었으며, 이러한 영향으로 2009년 이후부터 우리나라에는 지구온난화의 영향으로 다양한 기상이변이 속출하고 있음.
- 지구온난화를 막기 위해 1997년 교토의정서가 채택되어 온실효과를 보이는 6종의 온실가스의 배출량 감소 목표치를 정하였으며, 우리나라도 2002년 이 조약을 비준하여 온실가스 배출량의 감축의무를 지게 되었음.
- 유엔기후변화에 관한 정부간 패널 (IPCC)에서는 20세기 중반 이후 관측되는 지구 평균 온도의 증가는 인간 활동으로 발생한 온실가스의 증가가 주된 요인으로 지적하였고, 산업발전 및 도시화 등으로 인해 온실효과를 막을 수 있는 숲이나 습지가 파괴되면서 온실가스의 증가에 의한 지구온난화가 더욱 가속화됨.

Annual Greenhouse Gas Emissions by Sector

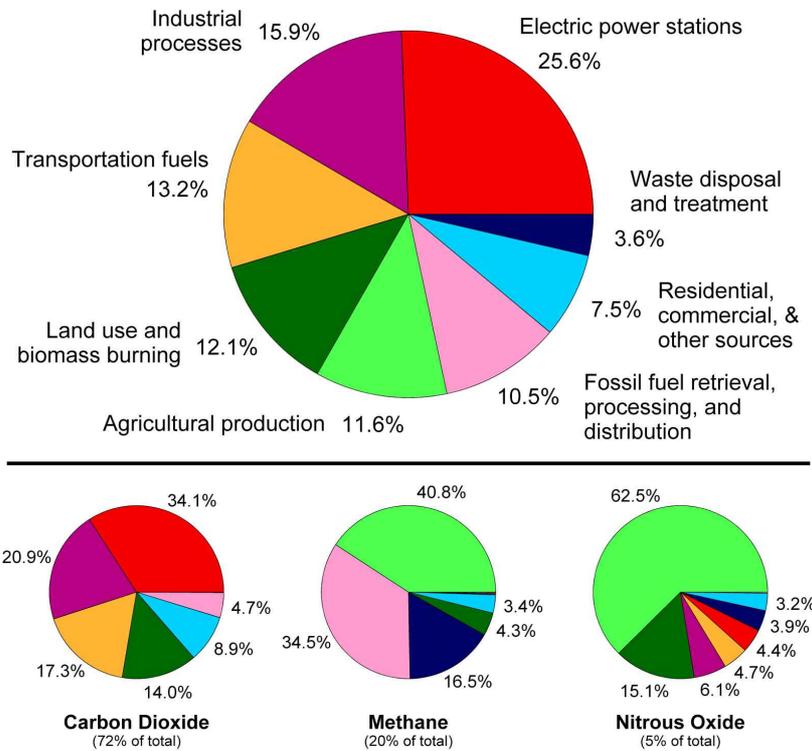


Fig. 5-75. 분야별 온실가스 배출 특성(2019)

- 지구온난화로 야기된 기후변화에 대한 국제사회의 관심은 1992년 브라질의 리우데자네이루에서 열린 유엔환경개발회의(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED)에서 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)을 채택함으로써 대두되었으며, 지난 20년간 기후변화협약, 교토의정서 발효/채택과 같은 국가 차원의 노력에도 불구하고, 세계 온실가스 배출량은 지속적으로 증가해 온 것으로 보고하였음
- 2015년 선진국과 개도국이 모두 참여하는 파리협정이 채택되었으며, 국제사회의 적극적인 노력으로 2016년 11월 4일 협정이 발효되었음. 파리협정의 목표는 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 2℃보다 훨씬 아래로 유지하고, 나아가 1.5℃로 억제하기 위하여 노력해야 한다는 것임.
- 이에 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 2100년까지 지구 온도 평균온도 상승 폭을 1.5℃ 이내로 제한하기 위하여 전 지구적으로 2030년까지 이산화탄소 배출량을 2010년 대비 최소 45% 이상 감축하여야 하고, 2050년경에는 탄소중립(Net-zero)을 달성하여야 한다는 것을 제시하였음.



Fig. 5-76. 주요 국제 기후변화 협약 내용 및 정책

② 우리나라의 온실가스 배출특성 및 2050 탄소중립 선언

- 우리나라의 2018년에 국가 온실가스 총 배출량은 727.6백만 톤 CO₂eq이었으며, 분야별 직접 배출량은 전환 부문에서 269.6백만 톤(37.1%), 산업 부문에서 260.5백만 톤(35.3%), 수송 부문에서 98.1백만 톤(13.5%), 건물 부문에서 52.1백만 톤(7.2%), 농축수산·폐기물 등 기타 부문에서 47.4백만 톤(6.6%)을 배출하는 것으로 조사되었음.
- 전환 부문에서 생산된 전력 소비에 따른 간접 배출량까지 포함하면 산업 부문 배출이 54.0%(392.9백만 톤)로 절반을 넘고 건물 부문이 24.6%(179.2백만 톤), 수송 부문이 13.7%(99.6백만 톤), 농축수산·폐기물 등 기타 부문이 7.7%(55.9백만 톤)를 차지함.

Table 5-89. 2018년 우리나라 온실가스 부문별 배출량 (단위: 백만 톤 CO₂eq 달러)

구분	배출량(직접)	총 배출량 대비 비율	배출량(직접+간접)	총 배출량 대비 비율
전환*	269.6	37.1%	269.6	(37.1%)*
산업	260.5	35.8%	392.9	54.0%
건물	52.1	7.2%	179.2	24.6%
수송	98.1	13.5%	99.6	13.7%
폐기물	17.1	2.4%	17.1	2.3%
농축산	24.7	3.4%	33.2	4.6%
탈루 등	5.6	0.8%	5.6	0.8%
흡수원	-41.3	-5.7%	-41.3	-5.7%
총 배출량	727.6	100%	727.6	100%
순배출량	686.3	94.3%	686.3	94.3%

*전환은 직접 배출과 간접 배출을 모두 합한 배출량 합산에는 포함되지 않음

- 우리나라는 국제사회의 정책을 반영하여 2020년 10월 28일 2050년 탄소중립을 선언 하였고 관계부처 합동으로 「2050 탄소중립 추진 전략」 과 ‘2050 탄소중립 비전’을 선포하였음. 2020년 12월 2030 국가온실가스 감축목표 상향안을 마련하여 UN에 제출되었으며, 특히 2018년 배출량(727.6백만 톤) 대비 △40%*(291백만 톤)를 감축하여 2030년 배출량을 436.6백만 톤으로 줄여서 NDC 상향안의 연평균 감축률은 4.17%로 미국, EU, 영국 등의 주요국 대비 도전적인 목표가 제시되었음.
- 앞서 언급된 분야에 농축수산 분야의 온실가스 감축량은 2018년 24.7백만톤에서 2030년 19.4백만 톤(21.6%, NDC)에서 NDC상향안인 2030년 18.0백만 톤으로 27.1%로 상

향조정되었음.



Fig. 5-77. 2030 국가온실가스 감축목표(NDC) 상향안 (2018년 대비 40% 감축)

③ 농축수산 분야 탄소중립 전망 및 온실가스 감축 수단

- 2030 국가온실가스 감축목표(NDC) 상향안에 의하면 농축수산분야는 저탄소농업, 가축 관리 및 고효율 설비보급으로 구분하여 감축목표를 제시하고 있음.
- 저탄소 농업은 논물 관리방식(간단관개, 물 얇게 대기) 개선 및 질소질 비료 사용 저감, 바이오차 보급 확대 등을 통해, 약 2.5백만 톤을 감축하고자 하며, 세부적으로 간단관개 비율(2주이상 비율) 확대(61%), 논물 얇게 대기 등 물관리*를 통해 담수 상태에서 발생하는 메탄 배출을 저감하고, 바이오차(Biochar) 사용 농법 확대를 통해, 토양 탄소 저장량을 증가시키고자 함.
- 가축관리는 가축분뇨 에너지 정화처리 확대, 저메탄사료 공급 확대, 분뇨 내 질소저감, 식생활 전환 등을 통해 약 3.3백만 톤 감축하고자 하며, 고효율 설비 보급 분야에서는 고효율 설비 및 농기계 전기·수소 전환(농업), 에너지 절감 시설·설비 보급, 어선 노후 기관 대체(수산) 등으로 0.9백만 톤을 감축하는 방안을 제시하고 있음.
- 농축수산 부문은 24.7백만 톤의 온실가스를 배출하여, 우리나라 온실가스 총배출량 중 3.4%(2018년 기준)를 차지하는 것으로 보고됨. 농축수산 부문은 타 부문과 달리 에너지 사용으로 인한 온실가스 배출의 비중이 작다는 특징이 있으며, 농축수산 부문 온실가스 배출량의 약 85.8%(21.2백만 톤)가 농작물 재배, 가축 사육 등 농업 생산과정에서 발생하는 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)로 구분됨.

Table 5-90. 농축수산부문 유형별 온실가스 배출량(2018) (단위: 백만 톤 CO₂eq)

배출량	비에너지					에너지 (농축수산)
	계	경종		축산		
		벼재배	농경지토양	장내발효	가축분뇨	
24.7	21.2	6.3	5.5	4.5	4.9	3.5

- 농축수산 부문의 2050년 탄소중립 시나리오는 ①식량안보를 담보하고, ②온실가스 감축을 통해 농어촌과 농어업의 지속가능성을 높이며, ③안전하고 건강한 먹거리를 생산·소비하는 것을 목표로 하여, 이를 달성하기 위해 가용할 수 있는 기술과 정책을 최대한 반영한다는 것임. 이와 같은 전제를 통해, 2050년 농축수산 부문 온실가스 배출량

은 2018년 24.7백만 톤 대비 37.7% 감소한 15.4백만 톤이 될 것으로 보고함.

Table 5-91. 농축수산 부문 온실가스 배출량 변화 (단위: 톤 CO₂eq)

구분	2018년	2050년
에너지	3.5백만	0.2백만
비에너지	21.2백만	15.2백만
합계	24.7백만	15.4백만

- 2050 탄소중립 실현을 위한 농축수산 분야의 온실가스 배출량 감축 수단은 연료전환, 영농업개선 및 가축 관리로 세분화되어 있음.
- 농축수산 시설 및 어선에서 사용되는 화석연료를 저탄소 에너지원으로 전환하는 것은 온실가스 감축 잠재력이 가장 크고 실현 가능성도 높은 수단임. 이에 기존 농축수산 시설에 사용되는 화석연료를 수소, 전기, 바이오매스와 같은 신재생에너지를 적극 확대하여 보급하고자 하며, 이를 통해 농축수산 부문의 에너지 사용으로 인한 2050년 온실가스 배출량을 2018년 대비 94.3%까지 감축이 가능할 것으로 예상하였음.
- 영농법 개선의 경우 기존의 화학비료 사용량을 감소시키고, 친환경 농업을 확대 및 보급하여 농경지의 메탄과 아산화질소 배출량을 감소시키고자 함. 세부적인 영농법의 개선 방식은 1) 논에 물관리 방식을 개선하여 담수상태로부터 배출되는 메탄가스 발생량을 저감, 2) 토양검정을 통해 질소질 비료의 적정량을 공급하여 아산화질소 배출을 저감, 3) 바이오차(Biochar) 토양개량제 보급을 통한 온실가스 배출량 저감으로 구분하였음.



Fig. 5-78. 농업분야 온실가스 배출량 저감을 위한 추진전략

④ 바이오차에 의한 탄소중립과 온실가스 감축

- 앞서 언급된 바와 같이 영농법 개선 방법 중에 하나는 바이오차를 토양개량제로 보급 및 확대 하는 것으로 보고하였음. 농업부산물 및 가축분뇨와 같은 유기성 폐기물 등에

협기성 조건에서 열분해하여 탄소함량을 높은 바이오차는 수백년전 아마존 인디언들이 땅을 비옥하게 만들기 위한 재료로 사용하여 왔으며, 미국 코넬대 연구진에 의하여 토양의 지력증진에 대한 효과뿐만 아니라 지구온난화 기체인 이산화탄소를 흡수고정하는 능력이 매우 뛰어난 것이 밝혀지면서 “사이언스 데일리”지는 바이오차가 기후 변화를 완화시키는 첨단 무기로 사용될 수 있음을 최신 연구를 인용하여 보도했으며, 최근 CNN(2009년)에서는 바이오차를 지구온난화 저감 8대 기술 중의 하나로 선정하였음.

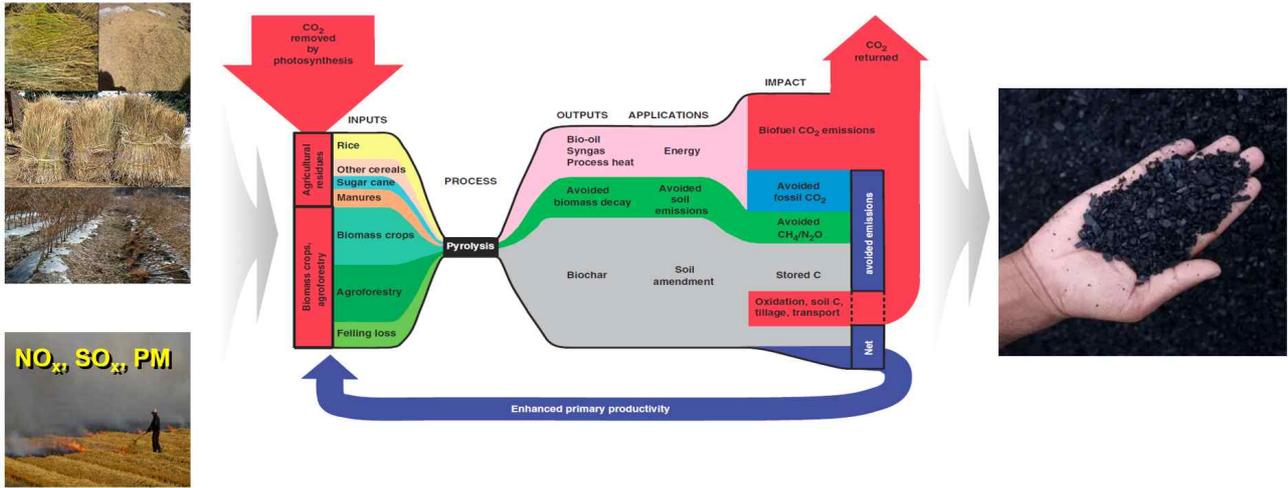


Fig. 5-79. 바이오매스의 열분해 과정에서 생성되는 부산물 특성

- 일반적으로, 식물이 광합성에 의해 대기 중의 이산화탄소를 흡수하면 약 50%는 호흡에 의해 대기 중으로 다시 방출되고 나머지는 식물의 성장을 통해 바이오매스에 고정화되게 되고, 이들이 고사되게 되면 토양 미생물에 의해 약 10년의 짧은 기간 동안 모두 분해되어 결과적으로 초기에 식물에 의해 흡수되었던 이산화탄소가 모두 방출되므로 탄소 중립이 됨. 반면에 본 연구 핵심 소재인 바이오차는 바이오차의 경우에는 바이오매스에 저장되었던 이산화탄소가 열분해를 통해 바이오차의 형태로 남게 되고 이는 토양에 들어가더라도 100년 이상 보존될 수 있기 때문에 토양 내에 탄소가 격리되어지는 전형적인 탄소 네가티브 소재임.
- 바이오차는 지력향상 뿐만 아니라 탄소를 수백년간 토양에 붙잡아 두는 좋은 친환경제이기도 하며, 지구온난화를 막아주는 이산화탄소를 흡수한다는 사실이 알려지면서 전 세계적으로 그 활용성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있음.

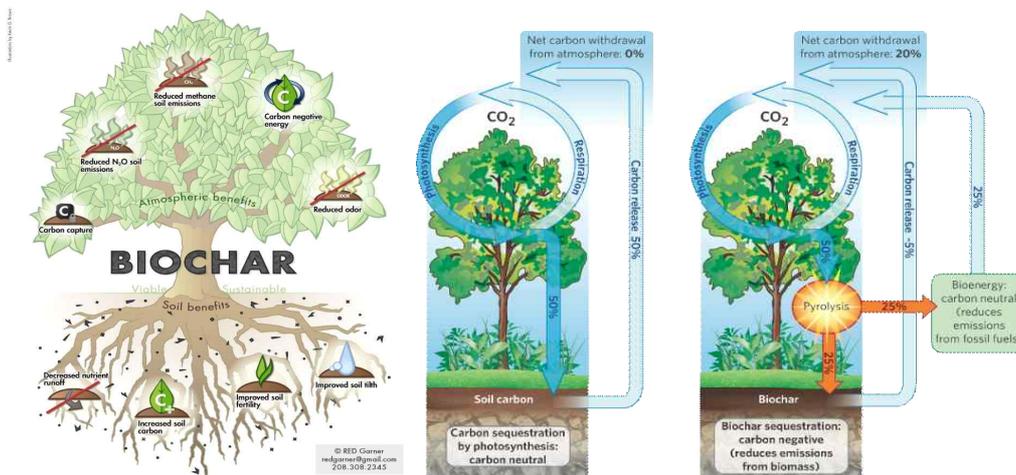


Fig. 5-80. 바이오차의 역할과 지구온난화 저감을 위한 모델

- 바이오차는 농업 발전에 획기적인 자극이 되고 있으며 토양 파괴를 방지하고 건강한 먹거리 생산과 황폐화된 토양 개량, 보습을 통한 식물체에 수분공급의 수월성, 보비성 등으로 인한 수확량의 증가로 그 효과가 나타나고 있으며, 또한 토양에 처리된 바이오차가 질소를 흡착하여 대표적 온실가스인 아산화질소의 대기 중 방출을 억제하며, 온실가스 중의 하나인 메탄도 감소시키는 것으로 알려져 있으며, 바이오차는 토양을 비옥하게 하고 식물생육을 촉진하므로 CO₂ 고정에 기여하고 토양 내에 많은 탄소를 축적하는 것으로 보고되고 있음.

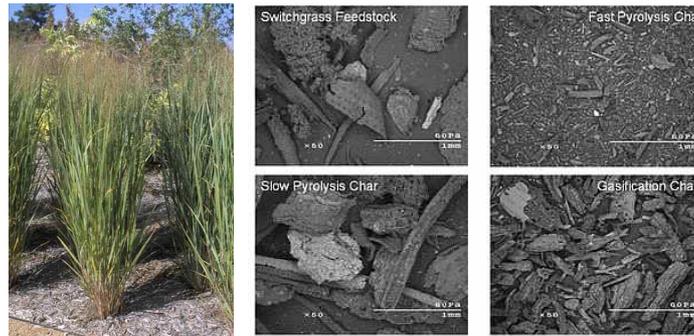
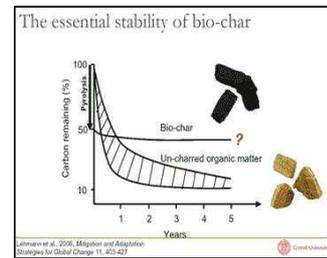
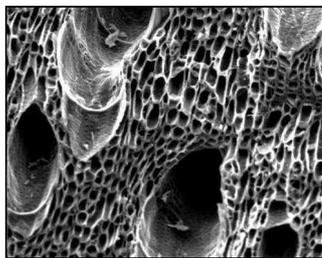


Fig. 5-81. 지팽이풀의 제조방법에 따른 바이오차 특성



[바이오차의 다공질성 구조] [바이오차의 작물재배 이용] [바이오차의 토양중 탄소격리 능력]

Fig. 5-82. 바이오차 구조 및 탄소 격리 능력

- 바이오차 처리에 의한 식물생육 증진 효과는 여러 연구자들에 의해 보고되고 있으며, Zwieter 등 (2010)은 바이오차는 종자발아 촉진효과가 있으며 바이오차 20%를 토양에 처리 시 대조구에 비해 식물생장이 약 30% 증가하는 현상을 보였다고 하였고, Shane Brockhoff (2009)는 100% 모래토양에서 잔디의 일종인 벤트그라스의 바이오차 처리에 따른 근권부 생장을 조사하였을 때 대조구에 비하여 바이오차 처리구에서 근권부 길이가 감소되었으며, 이는 바이오차 처리 토양이 보수력과 보비력이 개선되어 식물이 뿌리를 깊이 내리지 않아도 생육이 잘 이루어지기 때문이라고 하였음.



Fig. 5-83. 바이오차 적용 여부에 따른 작물의 생육특성 비교

- 바이오차는 농업 뿐만 아니라 환경적인 부분에서도 우수한 소재로 각광 받고 있음. 바이오차의 높은 비표면적을 가진 다공성 물질로서 오염물질의 흡착/여과에 효과적이라 보고되었으며, 각종 산업에서 배출되는 염료/항생제/중금속/유기성 화합물의 흡착제로 활용이 가능하다고 보고되었음.
- 최근 네이처지에 따르면, 온실가스 감축을 위한 농업관리 전략 중 바이오차가 가장 많은 양의 이산화탄소를 저감하는 것으로 보고가 되었으며, 과거 2009년까지 연간 100편 이내의 SCI급 논문이 게재되었던 반면에 최근에서는 연간 약 1400편의 논문이 보고되고 있는 상황으로 그만큼 국제사회에 바이오차의 연구에 대한 관심도가 높다는 것을 알 수 있음.

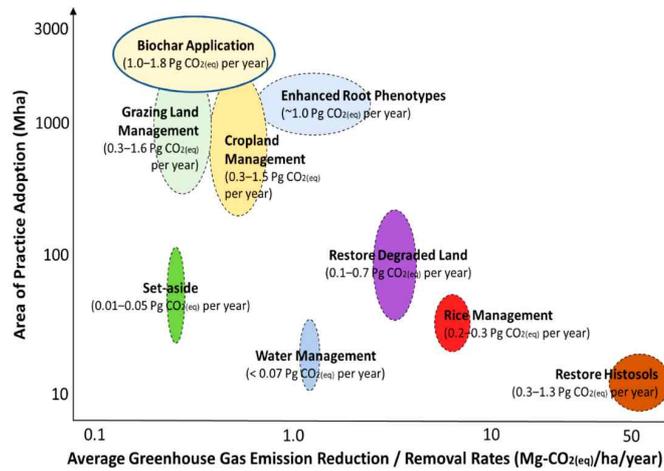


Fig. 5-84. 농업 온실가스 관리 전략 중 바이오차 우수성

- 바이오차의 2050 탄소중립 감축로드맵 내에 바이오차 토양개량제 보급량을 2030년에 40천 톤에서 2050년에 45천 톤으로 확대하고자 하며, 이를 통해 온실가스 감축량은 2030년에 58천 톤 CO₂-eq에서 2050년에 65천 톤 CO₂-eq를 달성하고자 함. 하지만 국내에 이러한 바이오차 적용 탄소중립과 온실가스 감축이라는 목적을 실현하기 위해서는 기술적/제도적/사회적 측면에서 풀어야 할 많은 문제들이 존재함.

(나) 개발된 축사바닥 깔짚의 탄소중립 효과 산정

- 바이오차의 온실가스 감축량은 아래의 식으로 산정함.

$$B_y = \sum_{p=1}^n (BC_{TOT_p} \times F_{C_p} \times F_{perp_p}) \times 3.664$$

B_y : y년도 바이오차 사용에 따른 온실가스 흡수량(tCO₂-eq/년)

BC_{TOT_p} : 생산 유형별 바이오차의 사용량(건조 중량기준) (ton/년)

F_{C_p} : 생산 유형별 바이오차의 유기탄소 함량(건조 중량기준) (%)

F_{perp_p} : 생산 유형별 살포된 바이오차의 100년 후 잔여 탄소비율 (%)

p : 바이오차의 생산 유형

Fig. 5-85. 바이오차의 온실가스 감축량 산정식

- 축사바닥 깔짚 개발에 사용된 바이오차 1톤의 예상 온실가스 감축량은 약 2.168톤 CO₂임.

Table 5-92. 바이오차 1 톤 살포 시 온실가스 감축량

온실가스 감축량	=	바이오차 사용량	×	바이오차 탄소 함량	×	100년 후 잔여 탄소비율	×	3.664
2.168톤CO ₂ /톤		1 ton (건조중량)		66.48%		89%		

바이오차 생산온도		100년 후 잔여탄소비율
고온	600℃ 초과	89%
중온	450℃ 초과 600℃ 이하	80%
저온	350℃ 이하 450℃ 이하	65%

- 국내 연간 깔짚 사용량은 약 300만톤이며, 개발된 깔짚에 투입되는 바이오차 양은 깔짚의 20%에 해당함. 국내 깔짚 전량을 개발된 깔짚으로 대체할 경우 깔짚 사용으로 인해 투입되는 바이오차의 양은 60만톤임.
- 바이오차 60만톤의 온실가스 감축효과는 약 130만톤 CO₂로 개발된 깔짚의 사용 및 퇴비를 생산하여 토양에 시용할 경우 기대할 수 있는 온실가스 감축효과는 연간 약 130만톤 CO₂임.



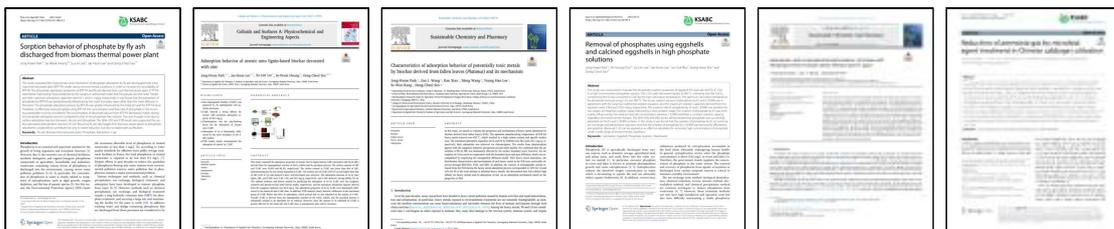
Fig. 5-86. 바이오차 깔짚의 연간 바이오차 감축효과

나. 정량적 연구개발성과

- 탄소중립을 실현하면서 가축 사육두수 증가로 인한 축산분뇨와 축사 악취 등 환경문제를 해결하기 위해 고기능성 바이오차 깔짚을 개발하여 실용화함
- (논문) 수분흡수속도를 이용한 깔짚 사용기간 국내최초 규명, 바이오차 활용 고기능성 축사바닥 깔짚의 악취저감 효과, 깔짚사용기간 연장, 부숙기간 단축 효과 규명 (전체 SCIE 6건, 비 SCIE 4건; 2023년 SCI 2건(JCR 상위 30% 1건), 비 SCI 2건)
 - 개발된 바이오차 깔짚은 기존 왕겨대비 깔짚사용기간을 50% 연장, 부숙기간을 27% 단축, 악취저거효율을 55% 향상시키는데 성공
- (특허) ‘바이오차, 피트모스, 미생물을 활용한 축사깔짚의 제조 방법’ 등 특허 등록 5건, 특허 출원 8건 완료 (2023년 특허 등록 4건, 특허 출원 3건)
- (기술이전) ‘바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진 기술’과 ‘바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법 및 활용 기술’ 기술이전 2건 실시
- (사업화) 깔짚 산업화를 위해 7개 실증포를 운영하여 현장검증을 완료하고 생산준비완료
 - 본 기술을 산업화를 위해 경남 창녕군에 3000평 부지에 깔짚 생산공장 신설
 - 2종의 깔짚제품(블랙랜드 바이오차, 토턴 바이오차)을 성공적으로 개발함
- (탄소중립효과) 바이오차 20% 깔짚 보급시 최대 130만톤 CO₂ 감축가능(연간 깔짚사용량 300만톤 기준, IPCC의 고온 Biochar 1톤 온실가스 감축량= 2.168톤CO₂; 건조중량기준)

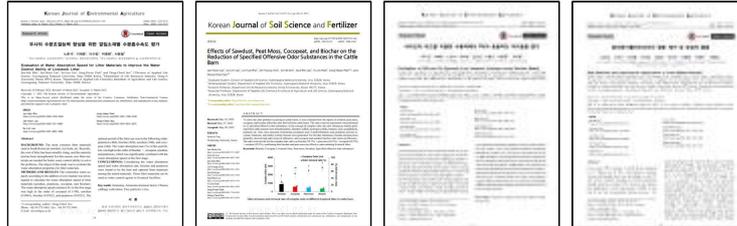
○ SCIE 논문 6건

- Characteristics of adsorption behavior of potentially toxic metals by biochar derived from fallen leaves (Platanus) and its mechanism(Sustainable Chemistry and Pharmacy, IF : 5.464, JCR 상위 30%)
- Adsorption behavior of arsenic onto lignin-based biochar decorated with zinc(Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, IF : 5.518)
- Sorption behavior of phosphate by fly ash discharged from biomass thermal power plant(Applied Biological Chemistry, IF : 3.2)
- Removal of phosphates using eggshells and calcined eggshells in high phosphate solutions(Applied Biological Chemistry, IF : 3.2)
- Agronomic and environmental performance of bottom ash discharged from biomass-based thermal power plant(Sustainable Chemistry and Pharmacy, IF : 6.0)
- Reduction of ammonia gas by microbial agent treatment in Chinese cabbage cultivation(Applied Biological Chemistry, IF : 3.2)



○ **비SCIE 논문 4건**

- 우사의 수분조절능력 향상을 위한 깔짚소재별 수분흡수속도 평가 (Korean Journal of Environmental Agriculture)
- Effects of Sawdust, Peat Moss, Cocopeat, and Biochar on the Reduction of Specified Offensive Odor Substances in the Cattle Barn (Korean Journal of Soil Science and Fertilizer)
- 바이오차 비드를 이용한 수용액에서 Pb의 효율적인 처리효율 평가(Korean Journal of Environmental Agriculture)
- 음식폐기물바이오차의 염분 제거 및 농업적 활용(Korean Journal of Environmental Agriculture)



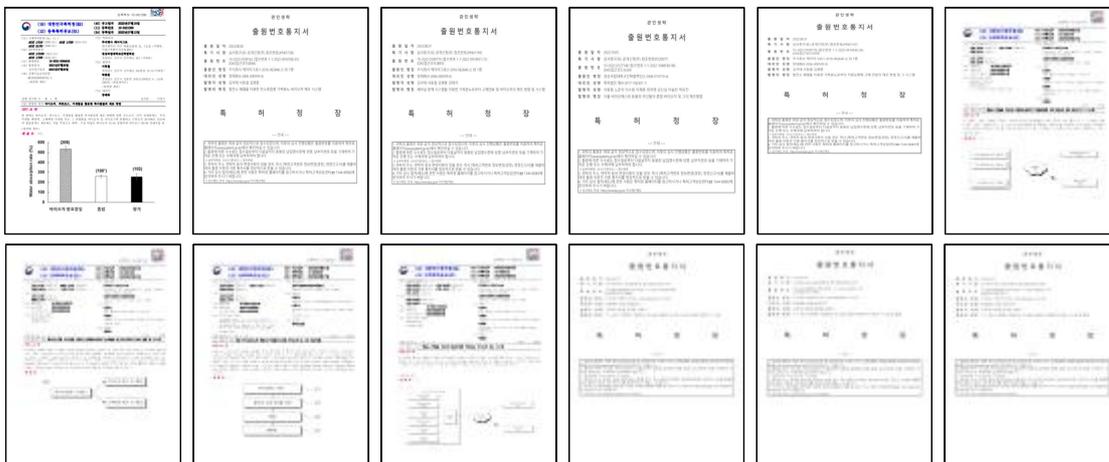
○ **국제학술대회 13건, 국내학술대회 7건**

- 최우수 포스터상 (2021 한국토양비료학회): 가축분뇨 축사바닥 깔짚소재 개발



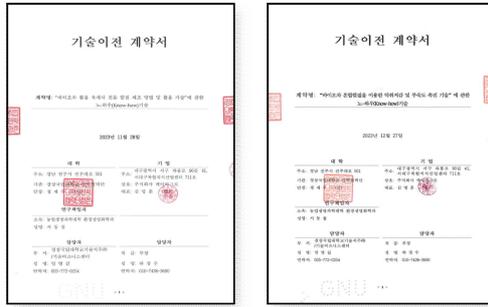
○ **특허 등록 5건, 출원 8건**

- 바이오차, 피트모스, 미생물을 활용한 축사깔짚의 제조 방법 (출원번호 : 10-2021-0094915) (등록번호 : 10-2421396)
- 발전소 폐열을 이용한 탄소중립형 가축분뇨 바이오차 제조 시스템(출원번호 : 10-2022-0109162) (등록번호 : 10-2588115)
- 발전소 폐열을 이용한 가축분뇨로부터 자원순환형 고체 연료의 제조 방법 및 그 시스템(출원번호 : 10-2022-0109778) (등록번호 : 10-2521745)
- 폐비닐 분해 시스템을 이용한 가축분뇨로부터 고체연료 및 바이오차의 제조 방법 및 시스템(출원번호 : 10-2022-0109779) (등록번호 : 10-2521749)
- 식물 바이오매스와 동물성 부산물의 혼합 바이오차 및 그의 제조방법(출원번호 : 10-2022-0127148) (등록번호 : 10-2569321)
- 수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 유기탄소비료의 제조 방법 및 시스템(출원번호 : 10-2023-0046944)
- 수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 탄질비료의 제조 시스템 및 방법(출원번호 : 10-2023-0046945)
- 수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 고체연료의 제조 시스템 및 방법(출원번호 : 10-2023-0046946)



○ 기술이전 2건(50,000천원)

- 바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법 및 활용 기술(2023.11.28.): 25,000천원
- 바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진 기술(2023.12.27.): 25,000천원



○ 제품화 2건

- 계사용 축사바닥 깔짚: 토턴 바이오차
- 우사용 축사바닥 깔짚: 블랙랜드 바이오차
- 제품화 진행 기업: (주)케이아그로(창녕공장 건설 후 생산), 신성미네랄(5월 출시), 이수농산(2024년 하반기 생산)



○ 고용창출 1명

○ 인력양성(석사 3명, 학사 7명)

○ 홍보 및 기타 성과

- 경상국립대학교 바이오차 연구센터 설립(2023.01.04.)
- (사)코리아 바이오차 협회 설립(2023.02.13.)
- 2023, 2024 탄소중립 바이오차 포럼 개최(여수, 부산)
- 바이오차 재직자과정 개설(2024.02.01.)
- 바이오차 깔짚 홍보 (18건)

[바이오차 연구센터 설립] [국내최초 바이오차 협회설립] [탄소중립 바이오차 포럼 개최] [바이오차 깔짚 홍보]



< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계 (2021~2022)	2단계 (2023~2023)	계	가중치 (%)	
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	논문	목표(단계별)	비SCIE 2 및 SCIE 4 (IF 2)	비SCIE 2 및 SCIE 2 (IF 2)	9	5	
		실적(누적)	비SCIE 2 및 SCIE 4 (IF: 3.2, IF: 5.51, IF: 5.46, IF: 3.2)	비SCIE 2 및 SCIE 2 (IF: 6, IF: 3.2)	10	5	
	특허출원	목표(단계별)	4	3	7	5	
		실적(누적)	5	3	8	5	
	특허등록	목표(단계별)	2	2	4	5	
		실적(누적)	1	4	5	5	
	학술발표	목표(단계별)	7	5	12	5	
		실적(누적)	12	8	20	5	
	연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	기술이전	목표(단계별)	-	2	2	10
			실적(누적)	-	2	2	10
기술료		목표(단계별)	-	50,000	50,000	5	
		실적(누적)	-	50,000	50,000	5	
제품화		목표(단계별)	-	2	2	30	
		실적(누적)	-	2	2	30	
매출액		목표(단계별)	-	500,000	500,000	25	
		실적(누적)	-	-	-	25	
인력양성		목표(단계별)	2	2	4	5	
		실적(누적)	6	4	10	5	
고용창출		목표(단계별)	-	1	1	5	
		실적(누적)	1	-	1	5	
정책활용		목표(단계별)	-	1	1	-	
		실적(누적)	-	-	-	-	
수상		목표(단계별)	-	-	-	-	
		실적(누적)	1	-	1	-	
홍보		목표(단계별)	-	-	-	-	
		실적(누적)	-	18	18	-	
계		목표(단계별)	20	22	42	100	
		실적(누적)	32	45	77	75	

* 1) 전담기관 등록·기탁 지표: 논문[SCI Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)], 특허, 보고서원문, 연구시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신제품 등을 말하며, 논문, 학술발표, 특허의 경우 목표 대비 실적은 기재하지 않아도 됩니다.

* 2) 연구개발과제 특성 반영 지표: 기술실시(이전), 기술료, 사업화(투자실적, 제품화, 매출액, 수출액, 고용창출, 고용효과, 투자유치), 비용 절감, 기술(제품)인증, 시제품 제작 및 인증, 신기술지정, 무역수지개선, 경제적 파급효과, 산업지원(기술지도), 교육지도, 인력양성(전문 연구인력, 산업연구인력, 졸업자수, 취업, 연수프로그램 등), 법령 반영, 정책활용, 설계 기준 반영, 타 연구개발사업에의 활용, 기술무역, 홍보(전시), 국제화 협력, 포상 및 수상, 기타 연구개발 활용 중 선택하여 기재합니다 (연구개발과제 특성별로 고유한 성과지표를 추가할 수 있습니다).

< 연구개발성과 성능지표 >

평가 항목 (주요성능 ¹⁾)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 ²⁾ (%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치		목표설정 근거
			보유국/보유기관	성능수준	성능수준	1단계 (YYYY~YYYY)	n단계 (YYYY~YYYY)	
1								
2								

* 1) 정밀도, 인장강도, 내충격성, 작동전압, 응답시간 등 기술적 성능판단기준이 되는 것을 의미합니다.

* 2) 비중은 각 구성성능 사양의 최종목표에 대한 상대적 중요도를 말하며 합계는 100%이어야 합니다.

다. 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Sorption behavior of phosphate by fly ash discharged from biomass thermal power plant	Applied Biological Chemistry	박종환, 황세욱, 이수림, 이재훈, <u>서동철</u>	64	South Korea	Springer	SCIE	2021.12.01	2468-0834	30
2	Adsorption behavior of arsenic onto lignin-based biochar decorated with zinc	Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects	박종환, 이재훈, 이수림, 황세욱, <u>서동철</u>	626	Netherlands	Elsevier	SCIE	2021.10.05	0927-7757	30
3	우사의 수분조절능력 향상을 위한 깔짚소재별 수분흡수속도 평가	Korean Journal of Environmental Agriculture	노준석, 이재훈, 이수림, 박종환, <u>서동철</u>	41(1)	South Korea	Korean Journal of Environmental Agriculture	비SCIE	2022.03.31	2233-4173	100
4	Effects of Sawdust, Peat Moss, Cocopeat, and Biochar on the Reduction of Specified Offensive Odor Substances in the Cattle Barn	Korean Journal of Soil Science and Fertilizer	이재훈, 노준석, 이수림, 최아영, 김신실, 이슬린, 박유진, 박종환, <u>서동철</u>	55(2)	South Korea	Korean Journal of Soil Science and Fertilizer	비SCIE	2022.05.28	0367-6315	100
5	Characteristics of adsorption behavior of potentially toxic metals by biochar derived from fallen leaves (Platanus) and its mechanism	Sustainable Chemistry and Pharmacy	박종환, Jim Wang, Ran Xiao, Meng Wang, 이영한, 강세원, <u>서동철</u>	29	Netherlands	ELSEVIER	SCIE	2022.06.29	2352-5541	50
6	Removal of phosphates using eggshells and calcined eggshells in high phosphate solutions	Applied Biological Chemistry	박종환, 최아영, 이수림, 이재훈, 노준석, 김성현, <u>서동철</u>	65	South Korea	Applied Biological Chemistry	SCIE	2022.11.15	2468-0834	30

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
7	바이오차 비드를 이용한 수용액에서 Pb의 효율적인 처리효율 평가	Korean Journal of Environmental Agriculture	박유진, 이재훈, 노준석, 최아영, 김신실, 이슬린, 박종환, 서동철	42(1)	South Korea	Korean Journal of Environmental Agriculture	비SCIE	2023.03.30	1225-3537	100
8	Agronomic and environmental performance of bottom ash discharged from biomass-based thermal power plant	Sustainable Chemistry and Pharmacy	박종환, Jim J. Wang, 서동철	33	Netherlands	ELSEVIER	SCIE	2023.04.25	2352-5541	50
9	음식폐기물 바이오차의 염분 제거 및 농업적 활용	Korean Journal of Environmental Agriculture	김신실, 노준석, 이재훈, 최아영, 이슬린, 박유진, 박종환, 이영한, 서동철	42(2)	South Korea	Korean Journal of Environmental Agriculture	비SCIE	2023.06.30	1225-3537	50
10	Reduction of ammonia gas by microbial agent treatment in Chinese cabbage cultivation	Applied Biological Chemistry	이재훈, 노준석, 이수림, 최아영, 김신실, 이슬린, 박유진, 박종환, 서동철	South Korea	Applied Biological Chemistry	SCIE	SCIE	2023.12.16	2468-0834	30

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021년도 (사)한국응용생명화학회 국제학술대회 및 제 110차 정기총회	박유진, 박종환, 이수림, 이재훈, 서동철	2021.08.23	제주 라마다호텔	대한민국
2	2021년도 (사)한국응용생명화학회 국제학술대회 및 제 110차 정기총회	류소정, 박종환, 이수림, 이재훈, 서동철	2021.08.23	제주 라마다호텔	대한민국
3	2021년도 (사)한국응용생명화학회 국제학술대회 및 제 110차 정기총회	나성연, 박종환, 이수림, 이재훈, 서동철	2021.08.23	제주 라마다호텔	대한민국
4	2021년 한국토양비료학회 제53차 총회 및 정기학술대회	나성연, 이재훈, 이수림, 노준석, 박종환, 서동철	2021.11.18	변산 소노벨리조트	대한민국
5	2021년 한국토양비료학회 제53차 총회 및 정기학술대회	박유진, 노준석, 이재훈, 이수림, 박종환, 서동철	2021.11.18	변산 소노벨리조트	대한민국
6	2021년 한국토양비료학회 제53차 총회 및 정기학술대회	최아영, 김신실, 이수림, 이재훈, 노준석, 박종환, 서동철	2021.11.18	변산 소노벨리조트	대한민국

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
7	2022 International Symposium and Annual Meeting of the KSABC	이재훈, 이수림, 노준석, 최아영, 김신실, 이슬린, 박종환, 서동철	2022.06.28	바르미 호텔 인터볼고 대구	대한민국
8	8th International Symposium on Soil Organic Matter	이재훈, 이수림, 노준석, 박미나, 박종환, 서동철	2022.06.29	그랜드 워커히 서울	대한민국
9	8th International Symposium on Soil Organic Matter	노준석, 이수림, 이재훈, 이시연, 박종환, 서동철	2022.06.29	그랜드 워커히 서울	대한민국
10	2022 한국환경농학회 정기총회 및 학술발표대회	이재훈, 이수림, 노준석, 최아영, 김신실, 이슬린, 박유진, 이시연, 박종환, 서동철	2022.07.07.	쑈비치 양양	대한민국
11	2022 한국토양비료학회 제54차 총회 및 정기학술대회	이재훈, 이수림, 최아영, 박유진, 박종환, 서동철	2022.10.21	소노캄 제주	대한민국
12	2022 한국토양비료학회 제54차 총회 및 정기학술대회	박유진, 이수림, 이재훈, 최아영, 박종환, 서동철	2022.10.21	소노캄 제주	대한민국
13	GSS 2023 4th Global Soil Security Conferenece	이재훈, 서동철	2023.06.27	Sofitel Ambassador Seoul, korea	대한민국
14	GSS 2023 4th Global Soil Security Conferenece	이재훈, 서동철	2023.06.27	Sofitel Ambassador Seoul, korea	대한민국
15	KSABC International Symposium 2023	이재훈, 서동철	2023.06.20	제주국제컨벤션센터	대한민국
16	KSABC International Symposium 2023	박유진, 이재훈, 김신실, 박종환, 서동철	2023.06.19	제주국제컨벤션센터	대한민국
17	한국환경농학회 2023 정기총회 및 학술발표대회	박유진, 이재훈, 김신실, 이슬린, 서동철	2023.07.07	소노벨 변산	대한민국
18	한국환경농학회 2023 정기총회 및 학술발표대회	최아영, 이재훈, 이슬린, 최여지, 서동철	2023.07.07	소노벨 변산	대한민국
19	한국환경농학회 2023 정기총회 및 학술발표대회	이재훈, 최아영, 박유진, 이승희, 서동철	2023.07.07	소노벨 변산	대한민국
20	2023 ASA, CSSA, SSSA INTERNATIONAL ANNUAL MEETING	이재훈, 노준석, 최아영, 박종환, 서동철	2023.10.31	America's Center Convention Complex	미국

기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	바이오차, 피트모스, 미생물을 활용한 축사깔짚의 제조 방법	대한민국	경상국립대학교, (주)케이아그로	2021.07.20	10-2021-0094915		경상국립대학교, (주)케이아그로	2022.07.12	10-2421396	75	
2	발전소 폐열을 이용한 탄소중립형 가축분뇨 바이오차 제조 시스템	대한민국	경상국립대학교, (주)케이아그로	2022.08.30	10-2022-0109162		경상국립대학교, (주)케이아그로	2023.10.06	10-2588115	50	
3	발전소 폐열을 이용한 가축분뇨로부터 자원순환형 고체 연료의 제조 방법 및 그 시스템	대한민국	경상국립대학교, (주)케이아그로	2022.08.31	10-2022-0109778		경상국립대학교, (주)케이아그로	2023.04.21	10-2521745	50	
4	폐비닐 분해 시스템을 이용한 가축분뇨로부터 고체연료 및 바이오차의 제조 방법 및 시스템	대한민국	경상국립대학교, (주)케이아그로	2022.08.31	10-2022-0109779		경상국립대학교, (주)케이아그로	2023.04.11	10-2521749	50	
5	식물 바이오매스와 동물성 부산물의 혼합 바이오차 및 그의 제조방법	대한민국	경상국립대학교, (주)케이아그로	2022.10.05	10-2022-0127148		경상국립대학교, (주)케이아그로	2023.08.17	10-2569321	50	
6	수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 유기탄소비료의 제조 방법 및 시스템	대한민국	경상국립대학교, (주)케이아그로	2023.04.10	10-2023-0046944					80	
7	수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 탄질비료의 제조 시스템 및 방법	대한민국	경상국립대학교, (주)케이아그로	2023.04.10	10-2023-0046945					80	
8	수소 생산 공정에서 발생하는 탄소를 이용한 고체연료의 제조 시스템 및 방법	대한민국	경상국립대학교, (주)케이아그로	2023.04.10	10-2023-0046946					80	

지식재산권 활용 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

□ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 ¹⁾	인증어부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

- * 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

- * 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	실치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	노하우 이전	바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법 및 활용 기술	(주)케이아그로	2023.11.28	25,000,000원	25,000,000원
2	노하우 이전	바이오차 혼합깔짚을 이용한 약취저감 및 부숙도 촉진 기술	(주)케이아그로	2023.12.27	-	25,000,000원

- * 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

□ 사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
1	기술이전	상품화	국내	토턴 바이오차 시제품 출시	계사용 축사 깔짚인 토턴 바이오차 시제품을 출시하였으며, 2024년 5월 제품 출시 예정임	(주)케이 아그로	-	-	-	-
2	기술이전	상품화	국내	블랙랜드 바이오차 시제품 출시	우사용 축사 깔짚인 토턴 바이오차 시제품을 출시하였으며, 2024년 5월 제품 출시 예정임	(주)케이 아그로	-	-	-	-

- * 1) 기술이전 또는 자기실시
- * 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등
- * 3) 국내 또는 국외

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내 국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수출				

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)			합계
			2021년	2022년	2023년	
1	깔짚 제조 사업화	케이아그로	-	1	-	1
합계			-	1	-	1

□ 고용 효과

구분		고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

□ 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	학위배출	2021	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-	-
2	학위배출	2022	-	1	4	-	-	5	-	-	5	-	-
3	핵위배출	2023	-	2	2	-	2	2	-	-	4	-	-

□ 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	인터넷 신문	쿠키뉴스	경상국립대, '바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법' 기술이전 [대학소식]	2023.12.04
2	인터넷 신문	경남일보	바이오차 활용 전용 깔짚 기술 이전	2023.12.05
3	인터넷 신문	cnb news	경상국립대, '바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법' 기술이전	2023.12.04
4	인터넷 신문	뽕뿌뉴스	[대학소식]경상국립대, '바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법' 기술 이전	2023.12.05
5	인터넷 신문	일요신문	[경상국립대] '항공우주ICT융합기술연구조합' 창립 외	2023.12.05
6	인터넷 신문	아주경제	[대학소식]경상국립대, 경남 창업기업 IR 경진대회서 '바이오션' 최우수상 수상 외	2023.12.04
7	인터넷 신문	경남뉴스투데이	'바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법' 기술이전	2023.12.04
8	인터넷 신문	경남에나뉴스	'바이오차 활용 육계사 전용 깔짚 제조 방법' 기술이전	2023.12.04
9	인터넷 신문	한국농어민신문	[K-아그로 '바이오차'] 목재펠릿 연소 부산물의 변신...농지 탄소 저장기능 높인다	2023.01.17
10	인터넷 신문	UNN	경상국립대, '바이오차 혼합깔짚' 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.11
11	인터넷 신문	대한경제	경상국립대, '바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.12
12	인터넷 신문	경남에나뉴스	'바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.11
13	인터넷 신문	뉴스경남	'바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.14
14	인터넷 신문	베리타스알파	경상국립대 '바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감/부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.11
15	인터넷 신문	cnb news	경상국립대, '바이오차 혼합깔짚 이용 악취저감·부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.12
16	인터넷 신문	경상국립대학교	'바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.11
17	인터넷 신문	경남경제	'바이오차 혼합깔짚 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.11
18	인터넷 신문	웹이코노미	'바이오차 혼합깔짚을 이용한 악취저감 및 부숙도 촉진' 기술 이전	2024.01.11

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	수상	최우수포스터상	가축분뇨 축사바닥 깔짚소재 개발	나성연	2021.11.18	한국토양비료학회

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/연구장비명	규격(모델명)	개발여부(○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자(YY.MM.DD)	구축비용(천원)	비고(설치 장소)

* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ SCI 논문 게재 (5건)	○ SCI 논문 게재 (6건)	120
○ 비SCI 논문 게재 (4건)	○ 비SCI 논문 게재 (4건)	100
○ 논문평균 IF (2)	○ 논문평균 IF (4)	200
○ 특허 출원 (7건)	○ 특허 출원 (8건)	114
○ 특허 등록 (4건)	○ 특허 등록 (5건)	125
○ 학술발표 (12건)	○ 학술 발표 (20건)	167
○ 인력양성 (4건)	○ 인력양성 (10건)	250
○ 고용창출 (1건)	○ 고용창출 (1건)	100
○ 기술이전 (2건)	○ 기술이전 (2건)	100
○ 기술료 (50,000,000원)	○ 기술료 (50,000,000원)	100
○ 제품화 (2건)	○ 제품화 (2건)	100
○ 매출액 (5억원)	○ 매출 발생예정 (생산판매이후 달성예정)	0(진행중)
○ 정책활용 (1건)	○ 정책건의로 1건 진행중	0(진행중)
○ 기술인증 (2건)	○ 기술인증 (재활용 환경성평가 진행중)	0(진행중)
○ 수상 (0건)	○ 수상 (1건)	200
○ 홍보 (0건)	○ 홍보 (18건)	1800

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 본 연구과제의 예상목표는 대부분 달성하였으나, 매출액, 정책활용, 기술인증 등 진행하는데 시간이 소요되는 부분으로 인해 일부 달성시점이 연기되었음.
- 매출액에 대한 연구성과는 본 연구과제가 3년간의 연구를 통해 성공적으로 수행되었으나, 최종 기술이전이 과제종료 시점인 2023년 11월 및 12월에 체결되어 산업화가 진행중에 있으나 목표달성 시기가 약간 연기되었음.
- 정책활용은 재활용환경성평가를 통과한 이후 환경부 순환경제분야 활성화를 위한 규제 샌드박스 제도에 우선 정책건의를 진행할 예정임.
- 기술인증은 본 연구과제 참여기관인 한국남동발전(주)에서 깔짚의 재활용환경성평가가 진행중에 있으며, 현재 재활용환경성평가의 최종단계로 3-4개월내 기술인증이 완료될 것으로 판단됨.

2) 자체 보완활동

- 현재 달성이 연기된 연구성과는 거의 마무리단계로 자체 보완활동 보다 현재 작업의 마무리만 하면 되는 상황임.
 - 매출액에 대한 연구성과는 최종 기술이전이 과제종료 시점인 2023년 11월 및 12월에 체결되어 목표달성 시기가 연기되었음. 2023년 초부터 경남 창녕군에 참여기업인 (주)케이아그로에 의해 3000평 부지에 깔짚 제조공장이 건설되고 있으며, 2024년 5-6월경 완공될 예정임. 생산라인이 완공 즉시 매출액이 발생될 수 있을 것으로 예상됨.
 - 정책활용은 재활용환경성평가를 최대한 빨리 진행하여 시범사업건의나 환경부 순환경제 분야 활성화를 위한 규제 샌드박스 제도에 정책건의를 하는 방안을 모두 고려 중에 있음.
 - 기술인증은 본 연구과제 참여기관인 한국남동발전(주)에서 깔짚의 재활용환경성평가가 2023년 초부터 진행중에 있으며, 현재 재활용환경성평가의 최종단계로 대략 3-4개월내 기술인증이 완료될 수 있게 보완하고 있음.
-

3) 연구개발 과정의 성실성

- 본 연구진은 당초 연구계획대로 바이오매스 전소발전소 발생 바이오차를 이용한 고기능성 축사바닥 발효깔짚(한우 또는 가금용) 소재 개발 및 실용화하기 위해 1차년도에 축사바닥용 바이오차 발효 깔짚 소재 제조 원천기술을 성공적으로 개발하였고, 2차년도에 실제 농가에 적용 가능한 축사바닥 바이오차 발효 깔짚 소재 개발 및 퇴비사 연계기술 개발을 성공적으로 수행하였으며, 3차년도에 개발된 깔짚을 활용한 체계적인 실증포 운영을 통해 깔짚의 미비점을 확인하고 보완하여 새로운 깔짚을 성공적으로 개발하였음.
 - 특허출원, 특허등록, SCI논문 게재, 학술발표 및 인력양성 성과를 초과 달성하였으며, 기존에 계획하지 않았던 수상 및 홍보 성과도 추가적으로 달성하여 전반적인 연구개발과정을 매우 성실하게 수행된 것으로 판단됨.
 - 비SCI논문 게재, 고용창출 및 기술이전 성과를 기존에 세운 계획대로 성공적으로 달성하였음.
 - 개발된 바이오차 혼합깔짚의 산업화시기를 앞당기기 위해 (주)하림 등에서 실증포를 확대운영하여 연구수행기간내에 검증을 마치고 산업화기반을 마련하였음.
 - 종합적으로 본 연구과제 계획대비 연구내용과 연구성과 모두 성공적으로 초과 달성된 것으로 판단됨.
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 현재 한국을 비롯한 세계 축산업 분야에 있어 가장 큰 민원의 화두는 가축분뇨로 인한 악취 발생이며, 특히 자연방목의 조건이 취약한 한국에서는 국민권익위 발생민원의 32%를 넘어서고 있으며 축산을 혐오산업으로 몰아가고 있는 실정임.
 - 축사바닥 깔짚으로 이러한 민원의 문제를 완화하고 가축사양에 있어 쾌적한 환경조성을 위한 노력은 축산에 있어 절박한 당면문제이며 사육환경 개선과 복지 축산의 중요한 미제라 할 수 있음.
 - 깔짚 방식의 사육 축종은 낙농, 한우, 양계(오리)의 범주로 현재 깔짚으로 사용되고 있는 톱밥과 왕겨로는 부숙도와 수분흡수율, 악취문제에 대응하는데 한계가 있음.
 - 현재 우리나라 토양은 비료, 농약 등 농자재의 과도한 사용으로 토양이 산성화되고 탄소와 수분 포집능력을 상실하여 토양이 황폐화되고 있음.
 - 현재 기후변화와 지구온난화로 인한 세계적 기후 재앙은 인간에 의한 영향으로 규명되고 있어 본 연구개발성과를 통해 농촌의 축산악취의 문제를 넘어 그 비중은 작으나 ‘기후위기’에 의한 세계적 위기를 극복할 수 있는 단초가 되는 데 기여할 수 있음.
 - 본 연구결과는 깔짚개발과 현장실증포 운영을 통해 축사 악취문제를 해결하고, 깔짚사용기간 연장, 퇴비부숙 촉진효과를 규명하여 산업화하였을 경우 기존 깔짚시장을 선도할 수 있을 것으로 기대됨.
 - 축사바닥 깔짚의 수분흡수속도 및 허용한계치에 대한 연구 논문을 게재하여 깔짚 관련 연구분야의 원천기반 기술을 구축하였으며, 특히 깔짚의 수분흡수속도를 이용한 깔짚 사용기간을 국내 최초로 규명하는 성과를 달성하여 향후 연구결과의 활용도가 높을 것으로 예상된다.
 - 축사에서 발생하는 악취를 저감하기 위한 연구는 그 동안 많은 연구자들에 의해 다양하게 진행되었지만 대부분의 기술이 현장적용에 실패하였음. 본 연구를 통해 축사에서 발생하는 악취를 깔짚으로 상당량 저감하게 되어 다른 연구와 연계를 통해 축사악취에 대한 현장애로사항을 상당부분 해결할 수 있을 것으로 기대됨.
 - 왕겨 및 톱밥 깔짚의 수급, 경제성, 부숙도 달성 등의 문제점이 대두되고 있는 시점에 기존의 깔짚의 문제점을 보완한 대체 깔짚을 제조 및 상용화함으로써 축산 농가의 부숙도 문제 및 악취 문제 해결에 큰 기여를 할 것으로 예상된다.
-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 특허 등록 완료한 ‘바이오차, 피트모스, 미생물을 활용한 축사깔짚의 제조 방법’을 활용하여 왕겨 및 톱밥의 대체 깔짚을 제조, 사업화한 후 상용화할 계획임.
- 참여기업인 (주)케이아그로에 의해 2023년 초부터 경남 창녕군에 3000평 부지에 깔짚 제조 공장이 건설되고 있으며, 2024년 5-6월경 완공될 예정으로 생산라인이 완공 즉시 가동하여 바이오차 혼합깔짚을 시장에 내놓을 계획임.
- 깔짚의 산업화에서 중요한 깔짚의 재활용환경성평가를 참여기관인 한국남동발전(주)의해 진행중이며, 현재 재활용환경성평가가 완료되는 대로 깔짚의 대량생산 및 유통 보급할 계획임.
- 개발된 깔짚이 적용된 퇴비의 고품질 및 고기능성을 입증하여 고품질 유기질 퇴비의 사업화를 시행할 계획이며, 고품질 유기질 퇴비를 농업에 적극 활용하여 농작물 생산성을 증대에 기여할 계획임.
- 개발된 깔짚에 바이오차가 포함되어 있기 때문에 개발된 깔짚이 적용된 퇴비를 농경지에 시용할 경우 현재 이슈인 2050 탄소 중립 사업에도 상당부분 기여할 수 있을 것으로 기대됨.
- 본 연구과제 수행중 확보한 연구자료를 활용하여 학술논문게재와 특허출원/등록을 추가로 진행할 계획이며, 연구개발 종료 후에도 본 연구과제를 기반으로 하여 석사급 이상의 전문인력을 양성할 계획임.

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내	
국외논문	SCIE	2024년 1건	
	비SCIE	-	
	계	2024년 1건	
국내논문	SCIE	-	
	비SCIE	2024년 1건	
	계	2024년 1건	
특허출원	국내	-	
	국외	-	
	계	-	
특허등록	국내	2024년 1건, 2025년 1건	
	국외	-	
	계	2024년 1건, 2025년 1건	
인력양성	학사	2024년 1명	
	석사	-	
	박사	-	
	계	2024년 1명	
사업화	상품출시	-	
	기술이전	-	
	공정개발	-	
제품개발	시제품개발	-	
비임상시험 실시		-	
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상	-
		2상	-
		3상	-
	의료기기	-	
진료지침개발		-	
신의료기술개발		-	
성과홍보		-	
포상 및 수상실적		-	
정성적 성과 주요 내용		-	

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1. 공통 요구자료	1) 자체평가의견서
	2) 연구성과 활용계획서

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 2025축산현안대응산업화기술개발사업 바이오 매스 전소발전소 발생 바이오차를 이용한 고기능성 축사바닥 발효깔짚 소재 개발 및 실용화 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부(농림식품기술기획평가원)에서 시행한 2025축산현안대응산업화기술개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.