



과제구분	기관고유	수행시기		전반기	
연구과제 및 세부과제명		연구분야	수행기간	연구실	책임자
안전농산물 생산을 위한 작물안전성 연구		농산물안전성	'21~'26	농업기술원 환경농업연구과	한정아
축분퇴비 유해미생물 조사 및 안전관리 기술 개발		농산물안전성	'22~'24	농업기술원 환경농업연구과	한정아
색인용어	축분퇴비, 항생제 내성, 퇴비부숙도, 농산물안전성				

ABSTRACT

This study examined the presence and antibiotic resistance of pathogenic bacteria in 124 manure-based compost samples (76 cattle, 34 swine, and 14 poultry) from Gyeonggi Province, South Korea. Pathogenic and indicator bacteria, including *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Salmonella enterica*, *Enterococcus* spp., *Staphylococcus* spp., *Acinetobacter* spp., and *Pseudomonas* spp., were identified using 16S rRNA gene sequencing and tested against 26 antibiotics. *S. enterica* from poultry manure showed 100% resistance to tetracycline and nalidixic acid. *Enterococcus faecium* and *E. faecalis* exhibited high resistance to gentamicin (86.0%) and quinupristin/dalfopristin (58.0%). *Staphylococcus* spp. from poultry also showed 100% resistance to quinupristin/dalfopristin, while *Acinetobacter* spp. and *Pseudomonas* spp. displayed high levels of multidrug resistance. Compost maturity was evaluated based on ammonia (NH₃) emissions, with immature composts showing elevated NH₃ levels and bacterial counts, indicating incomplete pathogen inactivation. A controlled trial confirmed that mechanical turning with aeration enhanced compost maturity and eliminated *E. coli* and *Salmonella* spp. To ensure the microbial safety of agricultural products, it is essential to control potential pathogens present in poultry manure compost self-produced by farms. This study suggests that effective management of harmful microorganisms during the composting process can contribute to enhanced safety of the final produce.

Keywords: Livestock manure compost, Antibiotic resistance, Compost maturity, Agricultural product safety

1. 연구목표

최근 건강에 관한 관심 증가와 함께 신선 채소의 소비가 꾸준히 늘어나고 있다. 신선 채소는 비타민, 미네랄, 식이섬유 등의 영양소가 풍부하고 기능성 물질을 함유하고 있어 현대인의 식단에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나 신선 채소는 가열 조리 과정 없이 생으로 섭취되는 특성으로 인해 미생물학적 위해요소에 취약하다는 문제점이 있다. 병원성 미생물에 의한 식중독 발생은 생활 수준이 높은 선진국에서도 계속 증가하고 있으며, 특히 신선 채소를 통한 식중독 사례가 지속적으로 보고되고 있다(Hong et al., 2012). 미국 질병통제예방센터(CDC)의 자료에 따르면, 최근 10년간(2011~2021년) 신선 농식품과 관련된 식중독 발생 원인균은 주로 살모넬라, 장출혈성 대장균(*Escherichia coli* O157:H7), 리스테리아 모노사이토제네스 등이며, 원일 식품으로는 새싹채소, 로메인 상추, 양파, 오이, 당근, 토마토, 양상추 등 채소류가 주를 이루고 있다고 하였다(Jeon et al., 2022). 식품의약품안전처의 ‘2016~2020년 병원성대장균 식중독 발생 현황’에 따르면, 채소류가 전체 식중독 환자의 67%(3,034명)로 가장 높은 비중을 차지하였다.

신선채소의 미생물 오염은 다양한 경로를 통해 발생할 수 있지만, 그중에서도 가축분뇨를 발효시켜 만든 퇴비가 주요 오염원으로 지목되고 있다. 농업에서 축분퇴비는 작물 생산에 필요한 양분을 공급하고 토양 구조를 개선하는 유기질 비료로 널리 활용되고 있으나, 부적절하게 처리된 퇴비는 병원성 미생물의 오염원이 될 수 있다. 특히 우분, 돈분, 계분 등의 가축분뇨에는 다양한 병원성 미생물이 존재할 가능성이 높아 이를 원료로 한 퇴비의 안전성에 대한 우려가 제기되고 있다. 현재 한국의 「비료관리법에 따른 공정규격」에서는 가축분퇴비에 대해 *E. coli* O157:H7과 *Salmonella* spp.와 같은 병원성 미생물이 불검출되어야 한다고 규정하고 있다(Ahn et al., 2021). 또한 퇴비의 부숙도 기준(콤백: 부숙완료, 솔비타: 부숙후기 또는 부숙완료, 종자발아법: 발아지수 70 이상)을 충족해야 한다(비료 공정규격 설정, 농촌진흥청 고시 제2024-28호). 그러나 비료관리법과 가축분뇨법 사이에 규제 불일치가 있어 가축분뇨법에 의한 퇴비는 비료관리법에 비해 유해성분 규제가 현저히 적은 실정이다. 특히 우려되는 점은 농가에서 자체적으로 제조하는 퇴비의 경우, 상업용 퇴비와 달리 품질 관리와 안전성 검사가 제대로 이루어지지 않을 수 있다는 것이다. 자가제조 퇴비의 부숙도에 따른 대장균 오염도를 조사한 결과, 완전히 부숙된 퇴비에서는 대장균이 검출되지 않았으나, 부숙이 덜 된 퇴비에서는 대장균이 검출되었다(Larney et al., 2003). 이는 부적절한 퇴비화 과정이 병원성 미생물의 생존과 직결됨을 시사한다.

이러한 배경에서 본 연구는 경기도 내 축분퇴비에 존재하는 유해미생물 분리 및 항생제 내성 패턴 분석을 통해 잠재적 위험 요인을 평가하고, 이를 기반으로 축분퇴비 안전관리 기술을 개발함으로써 농산물 생산 단계에서 안전성을 확보하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

<시험 1> 축분퇴비 종류별 안전성 모니터링

2022년부터 2023년까지 축종별로 우분 76점, 돈분 34점, 계분 14점 시료를 채취하고 냉장상태로 보관하여 실험실로 운반한 후 24시간 이내에 실험을 실시하였다(표 1). 식품 기준 및 규격의 미생물시험법(MFDS, 2020)에 의거하여 미생물 실험을 수행하였다. 농산물과 토양, 퇴비의 일반세균수, 대장균군, 대장균(*Escherichia coli*)의 정량적 분석은 건조필름배지(Aerobic count plate 3M petrifilm, E. coli/Coliform Count Plate 3M Petrifilm, 3M, St. Paul, MN, USA)를 이용하여 콜로니(colony)를 계수하여 colony-forming unit (CFU)/g으로 나타내었다. 채집한 시료로부터 위생지표세균인 대장균(*E. coli*), 폐렴막대균(*Klebsiella pneumoniae*), 장알균(*Enterococcus faecalis*, *E. faecium*)을 비롯해 주요 식중독균인 살모넬라(*Salmonella* spp.), 황색포도상구균(*Staphylococcus* spp.), 중요내성지표세균(*Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa*)을 분리하였다. 분리한 세균은 16S rRNA 염기서열을 분석하였고 BLAST 방법으로 Genebank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) 자료와 비교 분석하여 동정하였다. 그람 음성세균인 *E. coli*, *K. pneumoniae*, *Salmonella* spp., *Acinetobacter* spp. 및 *Pseudomonas* spp.와 그람 양성균인 *Staphylococcus* spp.와 *E. faecalis*, *E. faecium*로 동정된 세균만을 선정하여 항생제 저항성 검정에 사용하였다. 사용한 항생제는 26종으로 그람음성균에 대해서는 amikacin(AMI), ampicillin(AMP), azithromycin(AZI), cefotaxime(FOT), cefoxitin(FOX), ceftazidime(TAZ), ceftriaxone(AXO), chloramphenicol(CHL), ciprofloxacin(CIP), colistin(COL), gentamicin(GEN), imipenem(IMI), nalidixic Acid(NAL), streptomycin(STR), tetracycline(TET) 및 trimethoprim/sulfamethoxazole(SXT) 등 16종의 항생제를 사용하였다. 또한, 그람 양성균에 대해서는 ampicillin(AMP), chloramphenicol(CHL), ciprofloxacin(CIP), gentamicin (GEN), streptomycin(STR), tetracycline(TET), tylosin tartrate(TYL), vancomycin(VAN), daptomycin (DAP), erythromycin(ERY), florfenicol(FFN), kanamycin(KAN), linezolid(LZD), quinupristin/dalfopristin(SYN), salinomycin(SAL) 및 tigecycline(TGC) 등 16종의 항생제를 사용하였다. 분리한 세균에 대한 항생제 최소억제농도는 Sensititre ARIS HiQ(Thermo Fisher Scientific Inc.)와 E-test stripe을 이용하여 분석되었고(Jones et al., 2015; Kim et al., 2021) 항생제 저항성 여부는 CLSI(2020) 기준으로 판정하였다.

표 1. 축종별 시료수(2022~2023년)

연 도	축종			합 계
	소	돼지	닭	
2022	56	7	5	68
2023	20	27	9	56
합 계	76	34	14	124

<시험 2> 축분퇴비 부숙도와 유해미생물 상관관계 구명

2022년부터 2023년까지 축종별로 우분 35점, 돈분 30점, 계분 37점의 시료를 채취하고 냉장상태로 보관하여 실험실로 운반하였고, 운반 후 24시간 이내에 실험을 수행하였으며 대조군으로 시판퇴비 10종을 사용하였다. 식품 기준 및 규격의 미생물시험법(MFDS, 2020)에 의거하여 미생물 실험을 수행하였다. 일반세균수, 대장균군, 대장균(*Escherichia coli*)의 정량 및 정성분석을 위한 시료채취는 뒤집기 작업시에 하였으며, 분석방법은 <시험 1>과 동일한 방법으로 분석하였다. 가축분퇴비 제조시 시기별로 부숙도를 조사하기 위해 콤팩(ComMe-100)을 사용하여 부숙도를 조사하였다. 부숙도 측정전 상온에서 시료를 2시간 방치하였으며 용기에 표시선까지 퇴비를 넣고 용기 뚜껑의 홀더에 키트(Kit-A, KitB)를 고정한 후 뚜껑을 닫고 25°C에서 30분간 반응 후 반응된 키트를 측정용 용기에서 분리시켜 부숙도 판정기에 넣어 측정하였다(RDA, 2010). 암모니아 가스 발생량은 채취한 분 중 300g을 가스 포집 용기에 넣은 후 밀봉하여 실온에 2시간 정체시킨 후 가스분석기(GASTEC GV-100S, Japan)를 이용하여 암모니아(GASTEC detector tube, ammonia no. 3M, 3La, 3L, Japan)를 분석하였다.

<시험 3> 축분퇴비 유해미생물 저감기술 개발

본 시험은 안성 지역 방사형 양계장에서 수집한 계분을 퇴비화 원료로 사용하였으며, 2024년도 4월부터 10월까지 이천시 호법면 송갈리에 위치한 농가에서 수행하였다. 퇴비화 처리는 무처리 대조구, 뒤집기 작업 처리구, 송풍파이프+뒤집기 작업 처리구로 구성하였다. 송풍파이프는 지름이 10cm인 PVC관을 사용하였으며, 관의 측면에는 5시와 7시 방향으로 1.5cm의 구멍을 뚫고 구멍있는 쪽이 바닥을 향하게 놓은 후 사이 간격을 40cm로 배열하였다. 각 처리구별 퇴비는 높이 1.5m로 적층한 후 완숙퇴비로 덮어주어 내재된 미생물을 통해 초기 발효를 촉진하고 퇴비화 반응을 활성화하였다. 퇴비더미의 뒤집기 작업은 1차(5.9), 2차(5.27), 3차(6.24), 4차(8.25)으로 총 4회 실시하였으며, 작업은 포크레인을 이용하여 퇴비 전체가 골고루 섞이도록 하였다. 퇴적물의 온도를 측정하기 위하여 온도센서(Hobo Temp/RH data logger, USA)를 퇴적물의 상단, 중앙 및 하단 부분에 각각 설치하여 시간당의 평균온도를 측정하였다. 암모니아 가스 발생량 및 퇴비 부숙도 분석방법은 <시험 2>와 동일한 방법으로 분석하였다. 퇴비 재료 및 퇴적물의 미생물 정량 및 정성분석을 위한 시료채취는 뒤집기 작업시에 하였으며, 분석방법은 <시험 1>과 동일한 방법으로 분석하였다.



3. 결과 및 고찰

<시험 1> 축분퇴비 종류별 안전성 모니터링

E. coli 73균주를 분리하였고, 항생제 15종에 대해 감수성 검정을 수행한 결과 tetracycline에 대한 내성률이 23.3%로 가장 높았으며, 다음으로 ampicillin(17.8%), chloramphenicol(16.4%), ciprofloxacin, nalidixic acid(8.2%), cefotaxime, ceftriaxone, gentamicin(1.4%) 순으로 높게 나타났다(그림 1).

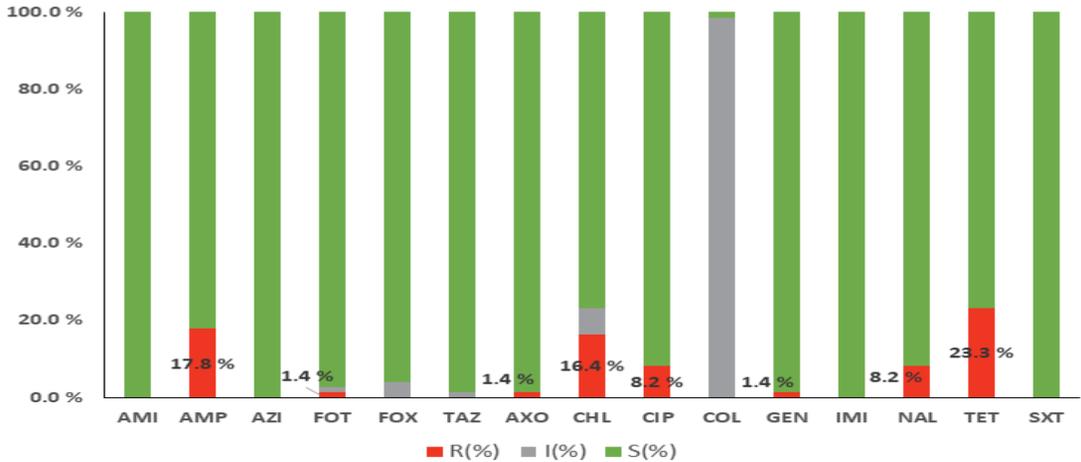


그림 1. 축분퇴비 분리 *E. coli*의 항생제 내성 패턴

K. pneumoniae 16균주를 대상으로 항생제 15종에 대해 감수성 검정을 수행한 결과, ampicillin에 대한 내성률이 93.8%로 가장 높았으며, 다음으로 chloramphenicol에 대한 내성률이 12.5%로 높았고, tetracycline, trimethoprim/sulphamethoxazole(6.3%) 순으로 나타났다(그림 2).

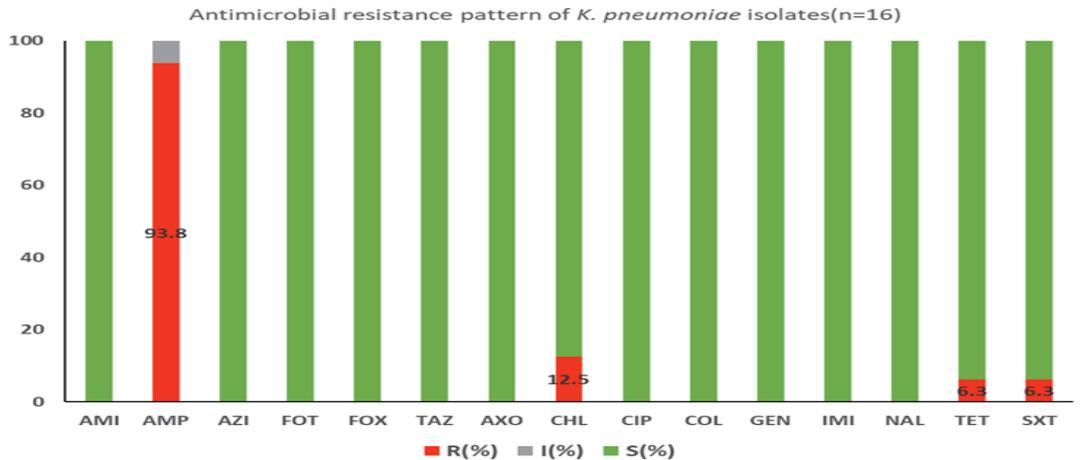


그림 2. 축분퇴비 분리 *K. pneumoniae*균의 항생제 내성 패턴



S. enterica 5균주를 대상으로 항생제 15종에 대해 감수성 검정을 수행한 결과 nalidixic acid과 tetracycline이 100%로 내성률이 가장 높았으며, 다음으로 ampicillin, cefotaxime, ceftriaxone, chloramphenicol, trimethoprim/sulphamethoxazole(80.0%)이었으며, cefoxitin 40% 순으로 나타났다(그림 3).

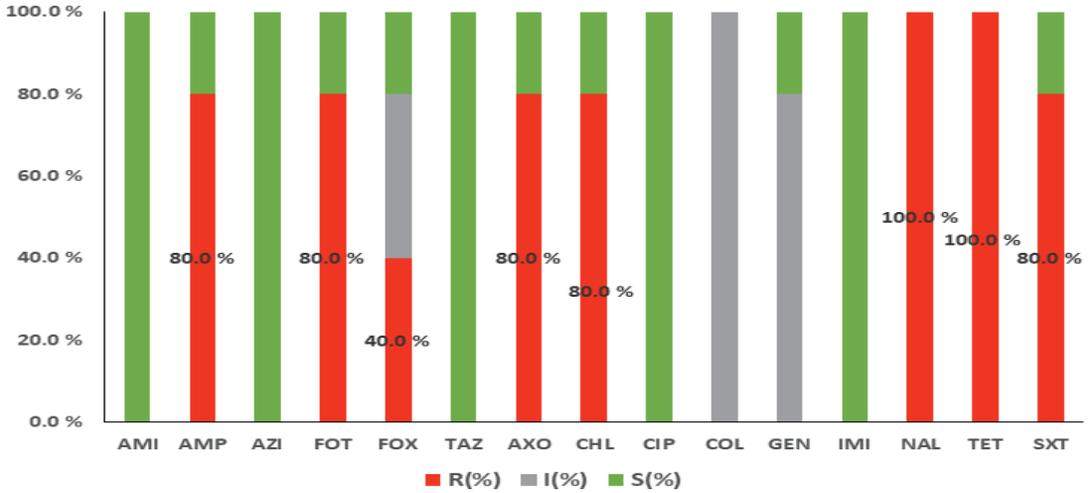


그림 3. 축분퇴비 분리 *S. enterica*균의 항생제 내성 패턴

E. faecium 50균주를 대상으로 항생제 16종에 대해 항생제 감수성 조사를 수행한 결과 gentamicin, streptomycin(86.0%)의 내성률이 가장 높았으며, quinupristin/dalfopristin(58.0%), ciprofloxacin(54.0%), tetracycline, daptomycin(20.0%) 순으로 나타났다(그림 4).

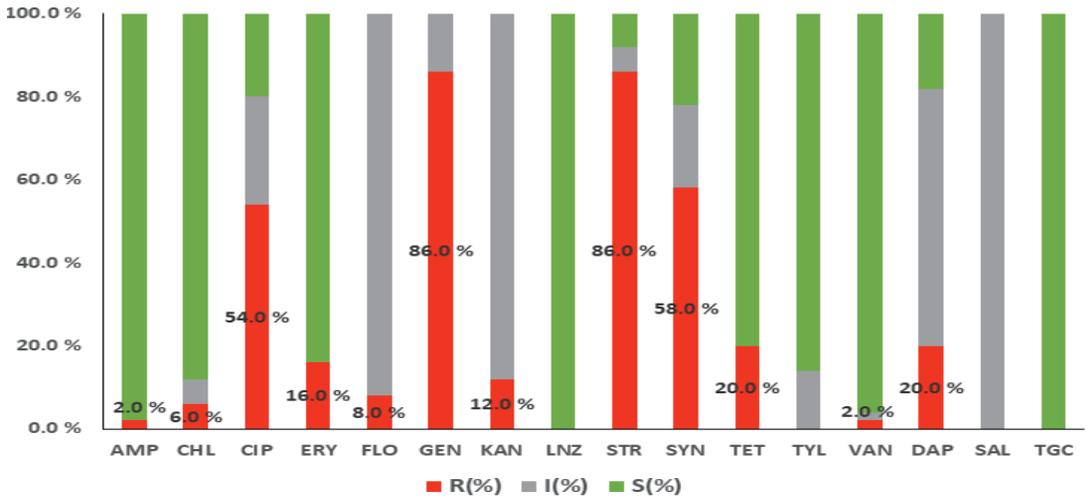


그림 4. 축분퇴비 분리 *E. faecium*균의 항생제 내성 패턴



E. faecalis 54균주에 대해 항생제 감수성 조사를 수행한 결과 자연내성인 gentamicin, quinupristin/dalfopristin을 제외하고 streptomycin(100.0%)에 대한 내성률이 가장 높았으며, tetracycline(57.4%), erythromycin(29.6%), daptomycin(20.4%), chloramphenicol, kanamycin(16.7%), florfenicol(14.8%), ciprofloxacin(11.1%), ampicillin, vancomycin(1.9%) 순으로 높게 나타났다(그림 5).

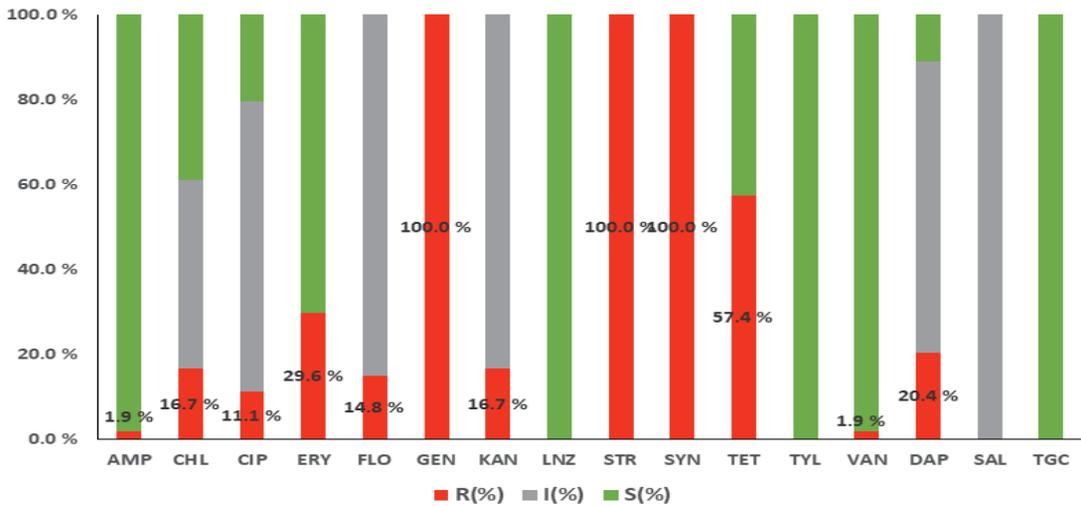


그림 5. 축분퇴비 분리 *E. faecalis*균의 항생제 내성 패턴

Staphylococcus spp. 50균주를 대상으로 항생제 13종에 대해 감수성 검정을 수행한 결과 아미노글라이코사이드계 항생제인 ampicillin, kanamycin, gentamicin(100%)에서 다른 항생제에 비해 내성률이 매우 높았다(그림 6).

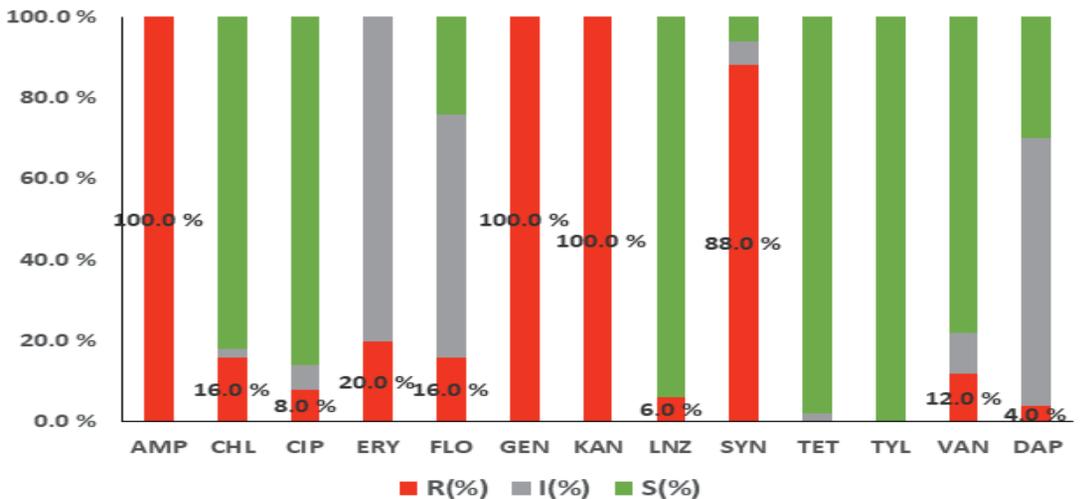


그림 6. 축분퇴비 분리 *Staphylococcus* spp.의 항생제 내성 패턴

Acinetobacter spp. 22균주를 대상으로 항생제 감수성 검정을 수행한 결과, 자연내성인 ampicillin을 제외하고 아미노글라이코사이드계 항생제인 ceftazidime, ceftriaxone, ciprofloxacin(94.1%)에 강한 내성을 보였으며 imipenem(20.6%), cefotaxime, colistin(11.8%) 순서로 내성률을 보였다(그림 7).

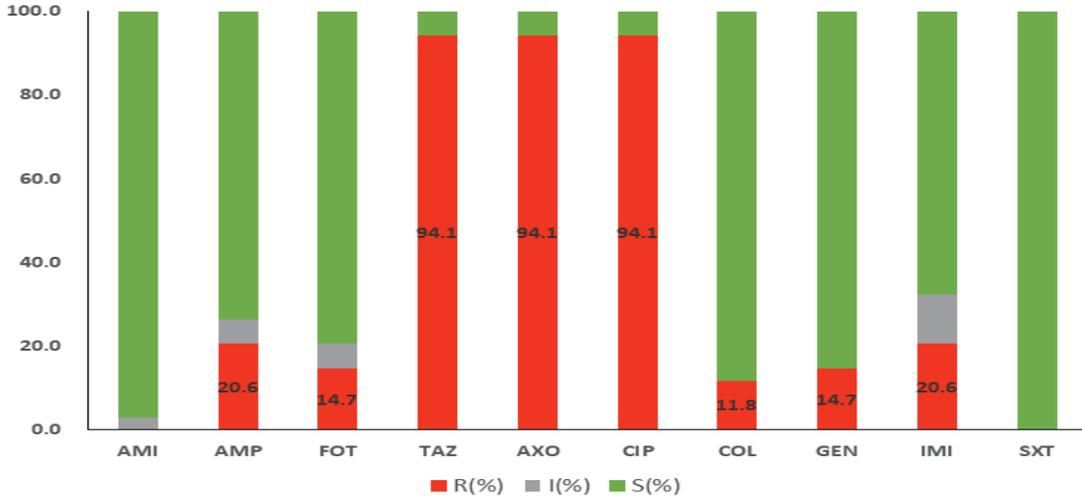


그림 7. 축분퇴비 분리 *Acinetobacter* spp.의 항생제 내성 패턴

Pseudomonas spp. 29균주를 대상으로 항생제 감수성 검정을 수행한 결과, 자연내성인 ampicillin, cefotaxime, chloramphenicol, tetracycline를 제외하면 azithromycin이 72.4%로 가장 높았으며 imipenem(10.3%), ciprofloxacin(3.4%) 순으로 나타났다(그림 8).

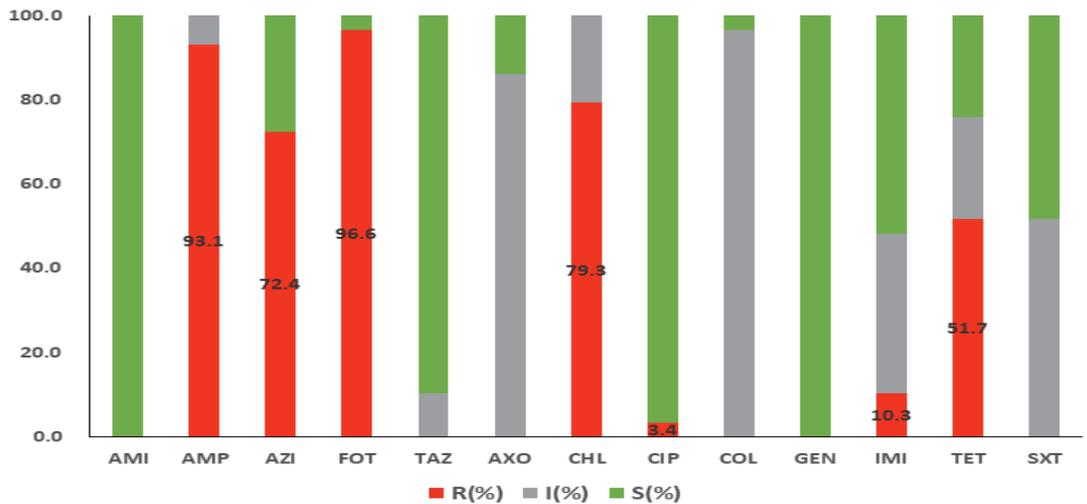


그림 8. 축분퇴비 분리 *Pseudomonas* spp.의 항생제 내성 패턴

축분퇴비에서 분리한 *E. coli* 73균주의 항생제 내성률을 조사한 결과는 표 2와 같다. 축종별 항생제내성률을 조사한 결과 전반적으로 계분 유래 균주에서 높았으며, 항생제별로 큰 차이가 있었다. 계분 유래 1균주는 ampicillin, chloramphenicol, ciprofloxacin, nalidixic acid, tetracycline 내성률이 100%으로 나타났다.

표 2. 축분퇴비 분리 대장균의 항생제 내성률

<i>E. coli</i> (n=73)	Amikacin	Gentamicin	Ampicillin	Azithromycin	Cefotaxime	Cefoxitin	Ceftazidime	Ceftriaxone	Chloramphenicol	Ciprofloxacin	Colistin	Imipenem	Nalidixic Acid	Tetracycline	Trimethoprim / Sulphamethoxazole
우분(n=59)	0.0	1.7	6.8	0.0	1.7	0.0	0.0	1.7	3.4	1.7	0.0	0.0	1.7	13.6	0.0
돈분(n=13)	0.0	0.0	69.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	69.2	38.5	0.0	0.0	38.5	61.5	0.0
계분(n=1)	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0

축분퇴비에서 분리한 *K. pneumoniae* 16균주의 항생제 내성률을 조사한 결과는 표 3과 같다. Gentamicin은 축종과 관계없이 높은 항생제내성률을 나타냈으며, ceftriaxone과 tetracycline은 돈분에서 분리된 균에서 항생제 내성이 나타났다.

표 3. 축분퇴비 분리 *K. pneumoniae*의 항생제 내성률

<i>K. pneumoniae</i> (n=16)	Amikacin	Gentamicin	Ampicillin	Azithromycin	Cefotaxime	Cefoxitin	Ceftazidime	Ceftriaxone	Chloramphenicol	Ciprofloxacin	Colistin	Imipenem	Nalidixic Acid	Tetracycline	Trimethoprim / Sulphamethoxazole
우분(n=10)	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
돈분(n=4)	0.0	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0
계분(n=2)	0	100.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*S. enterica*는 계분퇴비에서만 5균주가 분리되었으며, 이들의 항생제 내성률을 조사한 결과 nalidixic acid, tetracycline 내성률이 100%로 나타났으며, ampicillin, cefotaxime, ceftriaxone, chloramphenicol, trimethoprim/sulphamethoxazole은 80%로 나타나 β -lactam 계열 항생제에서 높은 내성률이 나타났다(표 4).

표 4. 축분퇴비 분리 *S. enterica*의 항생제 내성률

<i>Salmonella enterica</i> (n=5)	Amikacin	Gentamicin	Ampicillin	Azithromycin	Cefotaxime	Cefoxitin	Ceftazidime	Ceftriaxone	Chloramphenicol	Ciprofloxacin	Colistin	Imipenem	Nalidixic Acid	Tetracycline	Trimethoprim / Sulphamethoxazole
우분(n=0)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
돈분(n=0)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
계분(n=5)	0.0	0.0	80.0	0.0	80.0	40.0	0.0	80.0	80.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	80.0



축분퇴비에서 분리한 *E. faecium* 50균주의 항생제 내성률은 표 5와 같다. 축분퇴비에서 분리된 *E. faecium*는 다른 균종에 비해 대부분의 항생제에 대한 내성이 높게 나타났으며 특히, 자연내성을 나타낸 quinupristin/dalfopristin을 제외하면 ciprofloxacin의 내성률이 50.0%이상으로 가장 높았다. 국가항생제 사용 및 내성 모니터링 보고서(2023)에 따르면, 국내산 축산물에서 분리된 *Enterococcus* spp.는 ciprofloxacin(38.9%), quinupristin/dalfopristin(33.3%), tetracycline(24.1%)에서 높은 내성률을 보였다고 보고되었다. 한편, 사람에게 중요한 항생제인 linezolid는 모든 균주에서 항생제 내성이 나타나지 않았다. *E. faecalis* 54균주의 항생제 내성 양상은 표 6과 같다. *E. faecalis*의 경우 linezolid와 vancomycin 모든 시료에서 저항성 균주가 존재하였으며 특히 vancomycin resistant enterococci(VRE)는 중요한 병원성 감염 균종의 하나로 알려져 있다(Kim et al., 2007). VRE는 여러 유전자에 의해 내성이 발생하며, 이에 대한 표현형 확인과 내성 유전자형 구명을 위한 추가 연구가 필요하다.

표 5. 축분퇴비 분리 *E. faecium*의 항생제 내성률

<i>E. faecium</i> (n=50)	Ampicillin	Chloramphenicol	Ciprofloxacin	Daptomycin	Erythromycin	Linezolid	Quinupristin/Dalfopristin	Tetracycline	Vancomycin
우분(n=37)	0	0.0	54.1	21.6	2.7	0.0	51.4	10.8	0.0
돈분(n=5)	0	0.0	60.0	40.0	60.0	0.0	80.0	60.0	0.0
계분(n=8)	12.5	37.5	50.0	0	50	0	75.0	37.5	12.5

표 6. 축분퇴비 분리 *E. faecalis*의 항생제 내성률

<i>E. faecalis</i> (n=54)	Ampicillin	Chloramphenicol	Ciprofloxacin	Daptomycin	Erythromycin	Linezolid	Quinupristin/Dalfopristin	Tetracycline	Vancomycin
우분(n=30)	3.3	6.7	3.3	6.7	3.3	100.0	0.0	0.0	100.0
돈분(n=17)	0.0	35.3	17.6	58.8	35.3	100.0	41.2	0.0	100.0
계분(n=7)	0.0	14.3	28.6	57.1	14.3	100.0	28.6	0.0	100.0

축분퇴비에서 분리한 *Staphylococcus* spp. 50균주의 항생제 내성률을 조사한 결과는 표 7과 같다. Quinupristin/dalfopristin에 대해 우분 84.4%, 돈분 87.5%, 계분 100%의 가장 높은 내성률을 보였으며, 특히 계분에서 분리된 균주는 항생제에 대해 상대적으로 높은 내성을 나타냈다. 이는 축분퇴비 환경에서 항생제 사용으로 인한 선택압이 작용했을 가능성을 시사하며, 항생제 내성균 확산 방지를 위한 추가적인 연구와 관리가 필요하다.

표 7. 축분퇴비 분리 *Staphylococcus* spp.의 항생제 내성률

<i>Staphylococcus</i> spp. (n=50)	Chloramphenicol	Ciprofloxacin	Erythromycin	Linezolid	Quinupristin/ Dalfopristin	Tetracycline	Vancomycin
우분(n=32)	3.1	0.0	12.5	0.0	84.4	0.0	3.1
돈분(n=8)	12.5	0.0	12.5	12.5	87.5	0.0	0.0
계분(n=10)	60.0	40.0	50.0	20.0	100.0	0.0	50.0

축분퇴비에서 분리한 *Acinetobacter* spp. 34균주의 항생제 내성률을 조사한 결과는 표 8과 같다. 모든 축종에서 ceftazidime과 ciprofloxacin에 대해 90%이상 내성률을 보였으며, 계분에서 분리된 균주들이 여러 항생제에 대해 내성이 있어 다제내성균일 가능성이 높았다. Trimethoprim/Sulfamethoxazole에 대해서는 모든 균주가 감수성을 나타내었다.

표 8. 축분퇴비 분리 *Acinetobacter* spp.의 항생제 내성률

<i>Acinetobacter</i> spp. (n=22)	Gentamicin	Ampicillin	Ceftazidime	Ciprofloxacin	Colistin	Trimethoprim/ Sulfamethoxazole
우분(n=6)	0.0	4.8	95.2	95.2	4.8	0.0
돈분(n=12)	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0	0.0
계분(n=4)	45.5	54.5	90.9	90.9	27.3	0.0

축분퇴비에서 분리한 *Pseudomonas* spp.은 자연내성인 ampicillin, cefotaxime, chloramphenicol, tetracycline를 제외하고 azithromycin이 높은 내성률을 보였다(표 9). Tetracycline은 우분과 계분에서 66.7%, 75.0%로 높은 내성률을 보였고, Imipenem은 모든 균주에서 항생제 내성을 나타냈으며, amikacin, gentamicin, ceftazidime, trimethoprim/sulfamethoxazole에 대해서는 모든 균주가 감수성을 나타내었다.

표 9. 축분퇴비 분리 *Pseudomonas* spp.의 항생제 내성률

<i>Pseudomonas</i> spp. (n=29)	Amikacin	Gentamicin	Ampicillin	Azithromycin	Cefotaxime	Ceftazidime	Ceftriaxone	Chloramphenicol	Ciprofloxacin	Colistin	Imipenem	Tetracycline	Trimethoprim/ Sulfamethoxazole
우분(n=15)	0.0	0.0	100.0	80.0	100.0	0.0	0.0	93.3	6.7	0.0	6.7	66.7	0.0
돈분(n=10)	0.0	0.0	80.0	50.0	90.0	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0	10.0	20.0	0.0
계분(n=4)	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	25.0	75.0	0.0



<시험 2> 축분퇴비 부숙도와 유해미생물 상관관계 구명

2023년 농가에서 제조중인 퇴비 56점(우분 20점, 돈분 27점, 계분 9점)의 시료를 채취하여 위생지표세균 및 부숙도를 분석한 결과는 표 10과 같다. 분석 결과, 우분, 돈분, 계분에서 검출된 일반세균 밀도는 각각 6.52~9.58 log CFU/g, 5.47~9.73 log CFU/g, 8.22~10.15 log CFU/g으로 나타났다. Krueger 등(2002)은 축산 분변에서는 8 log CFU g⁻¹ 이상의 총균수가 검출된다고 보고하였고, Salanitro 등(1997)도 축산분변에 9~10 log CFU g⁻¹ 수준의 총균수가 존재한다고 하였다. 대장균군의 경우 우분에서 3.00~5.65 log CFU/g, 돈분에서 2.46~8.08 log CFU/g, 계분에서 3.39~8.02 log CFU/g이 검출되었다. 대장균은 우분에서 2.00~6.58 log CFU/g, 돈분에서 3.37~9.06 log CFU/g, 계분에서 3.62~7.05 log CFU/g이 검출되었다.

표 10. 2023년 축분퇴비 위생지표세균 및 부숙도 분석 결과

(단위: log CFU/g)

번호	시료명	종류	총호기성세균	대장균군	대장균	부숙도
1	23LMC-1	우분	6.97±0.14	3.20±0.31	3.02±0.28	부숙완료(80%)
2	23LMC-2	〃	6.87±0.09	3.47±0.17	2.16±0.06	부숙완료(80%)
3	23LMC-3	〃	7.51±0.20	3.53±0.21	4.73±0.04	부숙완료(80%)
4	23LMC-4	〃	8.35±0.06	ND	5.66±0.05	부숙완료(80%)
5	23LMC-5	〃	8.56±0.06	4.56±0.07	5.18±0.25	부숙완료(80%)
6	23LMC-6	〃	8.44±0.03	4.60±0.21	4.57±0.23	부숙완료(80%)
7	23LMC-7	〃	7.39±0.19	3.00±0.0	ND	부숙완료(80%)
8	23LMC-8	〃	9.00±0.01	4.60±0.06	3.85±0.20	부숙완료(80%)
9	23LMC-9	〃	8.32±0.13	ND	5.96±0.10	부숙완료(70%)
10	23LMC-10	〃	6.52±0.27	3.67±0.18	2.36±0.32	부숙완료(70%)
11	23LMC-11	〃	8.28±0.15	4.68±0.12	5.08±0.10	부숙완료(70%)
12	23LMC-12	〃	9.27±0.07	5.65±0.16	6.34±0.28	부숙완료(70%)
13	23LMC-13	〃	9.58±0.05	ND	ND	부숙완료(70%)
14	23LMC-14	〃	6.88±0.26	ND	ND	부숙중기(40%)
15	23LMC-15	〃	8.25±0.18	ND	ND	부숙완료(80%)
16	23LMC-16	〃	8.39±0.18	5.30±0.30	6.58±0.31	부숙완료(80%)
17	23LMC-17	〃	7.34±0.20	4.24±0.17	2.00±1.73	부숙완료(70%)
18	23LMC-18	〃	6.53±0.28	ND	ND	부숙완료(80%)
19	23LMC-19	〃	7.11±0.08	4.46±0.20	ND	부숙완료(80%)
20	23LMC-20	〃	8.84±0.07	4.44±0.29	ND	부숙완료(80%)
21	23LMC-21	돈분	8.67±0.08	7.63±0.13	ND	부숙완료(70%)
22	23LMC-22	〃	8.78±0.02	6.41±0.22	ND	부숙완료(80%)
23	23LMC-23	〃	8.58±0.16	6.24±0.06	ND	부숙완료(80%)
24	23LMC-24	〃	8.98±0.01	5.49±0.20	ND	부숙완료(80%)
25	23LMC-25	〃	8.92±0.05	6.81±0.28	ND	부숙완료(80%)
26	23LMC-26	〃	7.32±0.15	4.78±0.16	5.98±0.21	부숙완료(80%)
27	23LMC-27	〃	6.17±0.19	5.25±0.20	ND	부숙완료(80%)
28	23LMC-28	〃	7.16±0.09	5.96±0.10	ND	부숙완료(80%)



(계속)

번호	시료명	종류	총호기성세균	대장균군	대장균	부숙도
29	23LMC-29	돈분	6.28±0.16	4.33±0.20	ND	부숙완료(80%)
30	23LMC-30	〃	8.04±0.06	3.78±0.53	3.37±0.26	부숙완료(70%)
31	23LMC-31	〃	5.47±0.01	ND	ND	완전부숙(100%)
32	23LMC-32	〃	6.31±0.20	ND	ND	완전부숙(100%)
33	23LMC-33	〃	5.77±0.07	ND	ND	부숙중기(40%)
34	23LMC-34	〃	8.21±0.18	5.40±0.15	5.95±0.13	부숙초기(20%)
35	23LMC-35	〃	7.06±0.16	ND	ND	부숙완료(70%)
36	23LMC-36	〃	9.73±0.07	8.08±0.13	9.06±0.08	부숙완료(80%)
37	23LMC-37	〃	7.02±0.14	5.10±0.25	5.27±0.24	부숙완료(80%)
38	23LMC-38	〃	7.87±0.11	ND	ND	부숙중기(40%)
39	23LMC-39	〃	9.46±0.05	5.37±0.60	4.79±0.36	부숙완료(70%)
40	23LMC-40	〃	8.37±0.22	5.14±0.16	ND	부숙완료(70%)
41	23LMC-41	〃	7.50±0.15	3.99±0.18	4.26±0.24	부숙완료(80%)
42	23LMC-42	〃	9.26±0.07	4.73±0.55	4.96±0.24	부숙완료(70%)
43	23LMC-43	〃	9.09±0.06	5.18±0.39	5.45±0.40	부숙완료(70%)
44	23LMC-44	〃	9.04±0.07	2.54±0.34	ND	부숙초기(20%)
45	23LMC-45	〃	9.69±0.03	2.46±0.28	ND	부숙중기(40%)
46	23LMC-46	〃	7.39±0.08	4.03±0.47	3.41±0.29	부숙완료(80%)
47	23LMC-47	〃	8.14±0.23	4.36±0.10	4.24±0.28	부숙완료(80%)
48	23LMC-48	계분	9.22±0.09	ND	ND	부숙완료(70%)
49	23LMC-49	〃	9.27±0.11	6.68±0.03	6.55±0.03	부숙후기(60%)
50	23LMC-50	〃	9.84±0.03	5.47±0.10	ND	부숙초기(20%)
51	23LMC-51	〃	8.22±0.17	ND	ND	부숙완료(70%)
52	23LMC-52	〃	ND	5.57±0.26	5.40±0.23	부숙중기(40%)
53	23LMC-53	〃	9.23±0.06	3.39±0.11	3.62±0.23	부숙초기(20%)
54	23LMC-54	〃	9.54±0.37	5.62±0.08	ND	부숙완료(70%)
55	23LMC-55	〃	10.15±0.45	8.02±0.38	7.05±0.55	부숙후기(60%)
56	23LMC-56	〃	9.22±0.03	3.74±0.11	ND	부숙중기(40%)

J ND: Not Detected

2024년 농가에서 제조중인 퇴비 46점(우분 15점, 돈분 3점, 계분 28점)와 시판퇴비 10점의 시료를 채취하여 위생지표세균 및 부숙도를 분석한 결과는 표 11과 같다. 분석 결과, 우분, 돈분, 계분, 시판퇴비에서 검출된 일반세균 밀도는 각각 6.92~9.30 log CFU/g, 5.72~8.87 log CFU/g, 4.83~9.05 log CFU/g, 5.26~7.76 log CFU/g으로 나타났다. 시판퇴비가 가장 낮은 미생물 분포를 보였다. 대장균군의 경우 우분에서 3.14~6.43 log CFU/g, 돈분은 1개의 시료에서 5.72 log CFU/g, 계분에서 1.40~5.15 log CFU/g이 검출되었으며, 시판퇴비에서는 검출되지 않았다. 대장균은 우분에서 2.10~5.29 log CFU/g, 돈분은 1개의 시료에서 6.11 log CFU/g, 계분에서 1.30~5.58 log CFU/g이 검출되었고, 시판퇴비에서는 검출되지 않았다. 2022년에 미생물 밀도와 부숙도만 측정하였을 때 두 요인간 관계성이 보이지 않아 2023년에 암모니아 가스

농도를 측정하였다. 그 결과 높은 부숙도(80~100%)의 시료들은 대체로 낮은 NH₃ 농도(0~25 ppm)를 보이며, 낮은 부숙도(20~40%)의 시료들은 대부분 높은 NH₃ 농도(50~400 ppm)를 나타냈다. 시판퇴비의 시료는 대장균군과 대장균이 검출되지 않아 미생물학적으로는 안전하였으나, 가축분퇴비 공정규격에는 전체 시료 10점중 4점이 기준 미달이었다. 이는 완숙퇴비를 구입하여 사용한 농가에서도 작물 생육 저해 및 악취로 인한 민원이 발생하고 있는 실태를 설명하는 근거가 된다. 이러한 현상은 시판퇴비 중 일부가 부숙도 기준을 충족하지 못한 상태에서 유통되고 있음을 시사한다.

대장균군/대장균은 충분한 부숙 과정을 거치면 대부분 사멸되지만, 본 연구에서 관찰된 결과는 부숙 과정이 불충분하여 대장균군/대장균이 완전히 사멸하지 않은 상태에서 종료되었거나, 부숙 과정 이후 퇴비가 비위생적으로 관리되어 재오염되었을 가능성을 시사한다. 따라서 대장균군/대장균을 효과적으로 사멸시키기 위해서는 충분한 부숙 과정이 반드시 이루어져야 하며, 부숙 이후에도 퇴비가 재오염되지 않도록 철저한 위생 관리가 필요하다.

표 11. 2024년 축분퇴비 위생지표세균 밀도, 부숙도, 암모니아 분석 결과
(단위: log CFU/g)

번호	시료명	종류	총호기성세균	대장균군	대장균	부숙도	NH ₃ (ppm)
1	24LMC-1	우분	7.22±0.07	ND	ND	부숙중기(40%)	-
2	24LMC-33	ㄴ	7.92±0.17	ND	ND	부숙완료(80%)	1
3	24LMC-34	ㄴ	7.29±0.19	ND	ND	부숙완료(80%)	1
4	24LMC-35	ㄴ	8.28±0.03	4.09±0.11	4.11±0.03	부숙완료(80%)	22.5
5	24LMC-36	ㄴ	8.64±0.13	4.48±0.13	4.33±0.10	부숙완료(80%)	1
6	24LMC-37	ㄴ	8.06±0.11	3.78±0.16	3.62±0.12	부숙완료(80%)	2
7	24LMC-38	ㄴ	7.56±0.06	ND	ND	부숙완료(70%)	50
8	24LMC-39	ㄴ	9.15±0.02	3.42±0.24	2.58±0.51	부숙완료(80%)	25
9	24LMC-40	ㄴ	7.14±0.17	ND	ND	부숙완료(80%)	1
10	24LMC-41	ㄴ	9.30±0.09	6.43±0.03	4.54±0.08	부숙완료(80%)	0
11	24LMC-42	ㄴ	6.92±0.08	3.77±0.23	2.36±0.32	부숙완료(80%)	1
12	24LMC-43	ㄴ	7.37±0.13	3.14±0.26	2.38±0.44	부숙완료(80%)	1
13	24LMC-44	ㄴ	7.16±0.11	ND	2.10±0.17	부숙완료(80%)	0
14	24LMC-45	ㄴ	7.86±0.09	ND	ND	부숙완료(80%)	5
15	24LMC-46	ㄴ	9.00±0.03	ND	5.29±0.08	부숙완료(80%)	10
16	24LMC-2	돈분	8.87±0.04	5.68±0.17	6.11±0.12	부숙완료(70%)	18
17	24LMC-3	ㄴ	6.48±0.18	ND	ND	부숙완료(70%)	3
18	24LMC-4	ㄴ	5.72±0.12	ND	ND	부숙완료(80%)	1
19	24LMC-5	계분	7.64±0.05	ND	ND	부숙완료(80%)	-
20	24LMC-6	ㄴ	8.32±0.03	ND	ND	부숙완료(70%)	-
21	24LMC-7	ㄴ	6.28±0.05	ND	ND	부숙초기(20%)	-



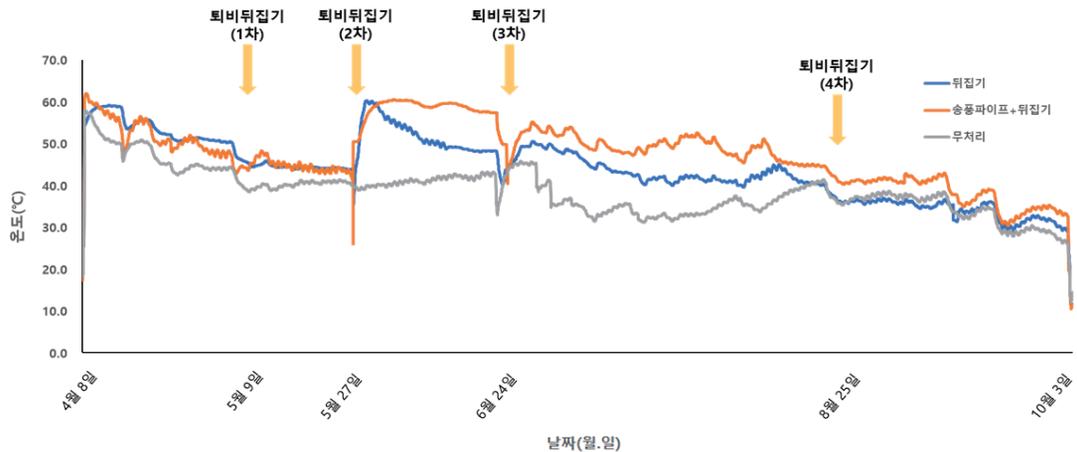
(계속)

번호	시료명	종류	총호기성세균	대장균군	대장균	부숙도	NH ₃ (ppm)
22	24LMC-8	계분	4.83±0.33	ND	ND	부숙초기(20%)	150
23	24LMC-9	〃	5.70±0.24	ND	ND	부숙초기(20%)	40
24	24LMC-10	〃	5.92±0.10	ND	ND	부숙초기(20%)	100
25	24LMC-11	〃	6.23±0.25	1.40±0.17	ND	부숙완료(80%)	2
26	24LMC-12	〃	6.31±0.14	ND	ND	부숙완료(70%)	4
27	24LMC-13	〃	6.69±0.21	ND	ND	부숙초기(20%)	100
28	24LMC-14	〃	8.00±0.06	ND	ND	부숙초기(20%)	400
29	24LMC-15	〃	6.45±0.11	ND	ND	부숙완료(80%)	7
30	24LMC-16	〃	7.25±0.04	ND	ND	부숙초기(20%)	150
31	24LMC-17	〃	8.80±0.09	ND	ND	부숙완료(80%)	2
32	24LMC-18	〃	8.81±0.04	ND	ND	부숙초기(20%)	200
33	24LMC-19	〃	8.17±0.04	ND	ND	부숙완료(70%)	2
34	24LMC-20	〃	7.24±0.05	ND	ND	부숙초기(20%)	50
35	24LMC-21	〃	7.74±0.40	5.15±0.21	5.58±0.42	부숙완료(80%)	2
36	24LMC-22	〃	9.42±0.09	2.72±0.10	1.30±0.30	부숙완료(70%)	11
37	24LMC-23	〃	7.99±0.07	ND	ND	부숙초기(20%)	250
38	24LMC-24	〃	9.05±0.02	3.35±0.19	3.41±0.16	부숙완료(80%)	15
39	24LMC-25	〃	7.83±0.10	ND	ND	부숙중기(40%)	50
40	24LMC-26	〃	8.02±0.09	3.42±0.23	2.12±0.22	부숙초기(20%)	50
41	24LMC-27	〃	8.32±0.11	4.50±0.65	ND	부숙완료(70%)	4
42	24LMC-28	〃	7.38±0.17	ND	ND	부숙완료(70%)	3
43	24LMC-29	〃	8.58±0.14	ND	4.90±0.13	부숙완료(70%)	7
44	24LMC-30	〃	7.01±0.11	3.73±0.05	ND	부숙완료(80%)	0
45	24LMC-31	〃	8.47±0.35	ND	ND	완전부숙(100%)	3
46	24LMC-32	〃	8.31±0.09	ND	ND	부숙초기(20%)	50
47	24LMC-47	시판	7.76±0.10	ND	ND	부숙초기(20%)	200
48	24LMC-48	〃	7.65±0.04	ND	ND	부숙완료(80%)	2
49	24LMC-49	〃	5.37±0.27	ND	ND	부숙초기(20%)	400
50	24LMC-51	〃	5.50±0.14	ND	ND	부숙초기(20%)	200
51	24LMC-52	〃	5.52±0.10	ND	ND	완전부숙(100%)	0
52	24LMC-53	〃	6.28±0.13	ND	ND	부숙완료(80%)	0
53	24LMC-54	〃	5.26±0.17	ND	ND	부숙초기(20%)	200
54	24LMC-55	〃	7.70±0.23	ND	ND	부숙완료(80%)	1
55	24LMC-56	〃	6.95±0.12	ND	ND	부숙완료(80%)	1
56	24LMC-57	〃	6.64±0.09	ND	ND	부숙완료(80%)	0

J ND: Not Detected

<시험 3> 축분퇴비 유해미생물 저감기술 개발

퇴비 제조 기간 동안 모든 처리구에서 혼합 1일 후 퇴비 내부 온도가 급격히 상승하여 65~70℃에 도달하였으며, 이후 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한 퇴비 더미를 뒤집은 직후에는 온도가 다시 상승하여 약 60℃ 내외까지 도달하였다가, 다시 서서히 감소하였다. 퇴비 더미의 뒤집기는 내부 온도가 50℃ 이하로 내려갔을 때를 기준으로 실시하였다. 4차 뒤집기 이후에는 더 이상 뚜렷한 온도 상승이 나타나지 않아, 부숙이 완료된 것으로 판단된다(그림 9).



※ 퇴비뒤집기 1차(5.9), 2차(5.27), 3차(6.24), 4차(8.25)

그림 9. 퇴비 제조기간 중 내부온도 변화

퇴비 제조 기간 동안 모든 처리구는 1차 및 2차 뒤집기 시점까지 ‘부숙초기’ 단계에 해당하였으며, 이는 퇴비 내 유기물의 분해가 아직 활발히 진행 중임을 의미한다. 이후 3차 뒤집기 시점부터는 모든 처리구에서 부숙완료 상태에 도달하였고, 이때부터 퇴비의 안정화가 확인되었다. 부숙 완료 시점의 암모니아(NH₃) 농도를 비교한 결과, 뒤집기+송풍 처리구에서 가장 낮은 농도(22.5ppm)를 나타내어 퇴비화가 가장 효과적으로 이루어진 것으로 판단된다. 반면, 무처리 구간은 3차 뒤집기 후 암모니아(NH₃) 농도가 100ppm으로 가장 높았고, 4차 뒤집기 이후에도 50ppm 수준으로 유지되어, 부숙은 완료되었으나 처리 효율은 낮은 것으로 나타났다. 따라서 퇴비화 과정에서 송풍을 병행한 뒤집기 처리는 부숙을 촉진하고 품질을 향상하는 데 효과적인 방법으로 판단된다(표 12).

표 12. 퇴비 제조기간 중 부숙도 변화

처리내용	뒤집기 1차	뒤집기 2차	뒤집기 3차	뒤집기 4차
뒤집기	부숙초기	부숙초기	부숙완료(NH ₃ 50ppm)	부숙완료(NH ₃ 27.5ppm)
뒤집기 + 송풍	부숙초기	부숙초기	부숙완료(NH ₃ 50ppm)	부숙완료(NH ₃ 22.5ppm)
무처리	부숙초기	부숙초기	부숙완료(NH ₃ 100ppm)	부숙완료(NH ₃ 50ppm)

퇴비화 전후 위생지표 미생물 밀도 변화를 분석한 결과, 총호기성세균은 처리 전후 모든 처리구에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 퇴비화 과정 동안 미생물 활성이 지속되었음을 의미한다. 대장균군의 경우, 퇴비화 이후 뒤집기+송풍 처리구에서 검출되지 않아 위생적 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 대장균은 퇴비화 후 처리구에서 검출되지 않았으며, 병원성 세균인 *Salmonella* spp. 및 *E. coli* O157:H7도 처리 전후 모든 시료에서 검출되지 않아 퇴비의 위생적 안전성이 확보된 것으로 판단된다(표 13).

표 13. 퇴비 제조 전·후 위생지표 미생물 밀도 변화

(단위: log CFU/g)

처리내용	처리전			뒤집기 4차		
	총호기성세균	대장균군	대장균	총호기성세균	대장균군	대장균
뒤집기	8.54 ± 0.09	ND	ND	8.07 ± 0.11	3.49 ± 0.25	ND
뒤집기 + 송풍	7.66 ± 0.34	ND	5.20 ± 0.07	7.71 ± 0.12	ND	ND
무처리	7.94 ± 0.43	ND	ND	8.43 ± 0.07	2.29 ± 0.42	ND

* *Salmonella* spp., *E. coli* O157:H7균은 처리전·후 모든시료에서 검출되지 않음

4. 적 요

본 연구는 경기도내 축분퇴비에 존재하는 유해미생물 분리 및 항생제 내성 패턴 분석을 통해 잠재적 위험 요인을 평가하고, 이를 기반으로 축분퇴비 안전관리기술을 개발함으로써 농산물 생산단계에서의 안전성을 확보하고자 수행한 연구결과는 다음과 같다.

<시험 1> 축분퇴비 종류별 안전성 모니터링

가. 총 124건의 시료로부터 *E. coli* 73균주, *K. pneumoniae* 16균주, *S. enterica* 5균주, *Enterococcus* spp. 104균주, *Staphylococcus* spp. 50균주, *Acinetobacter* spp. 22균주, *Pseudomonas* spp. 29균주가 분리되었다.

나. *E. coli* 73균주를 대상으로 항생제 15종에 대해 감수성 검정을 수행한 결과 tetracycline에 대한 내성률이 23.3%로 가장 높았으며, ampicillin(17.8%), chloramphenicol(16.4%), ciprofloxacin, nalidixic acid(8.2%), cefotaxime,

- ceftriaxone, gentamicin(1.4%) 순서로 내성률을 보였다.
- 다. *K. pneumoniae* 16균주를 대상으로 항생제 15종에 대해 감수성 검정을 수행한 결과 ampicillin에 대한 내성률이 93.8%로 가장 높았으며, 다음으로 chloramphenicol(12.5%), tetracyclin, trimethoprim/sulphamethoxazole(6.3%) 순서로 내성률을 보였다.
- 라. *Salmonella enterica* 5균주는 모두 계분에서 분리되었으며, tetracycline과 nalidixic acid에 대해 100% 내성률을 보였고, ampicillin, ceftriaxone, chloramphenicol, trimethoprim/sulphamethoxazole에 대해 80%의 높은 내성률을 나타냈다.
- 마. *E. faecium* 50균주는 gentamicin과 streptomycin에 대한 내성률이 86.0%로 가장 높았으며, *E. faecalis* 54균주는 streptomycin에 대해 100%의 내성률을 보여 다제내성균 발생 가능성을 시사했다.
- 바. *Staphylococcus spp.* 50균주를 대상으로 항생제 13종에 대해 감수성 검정을 수행한 결과 계분에서 분리된 균주가 다른 축종보다 항생제 내성이 높았으며, 특히 quinupristin/dalfopristin에 대해 우분 84.4%, 돈분 87.5%, 계분 100%의 높은 내성률을 보였다.
- 사. *Acinetobacter spp.* 22균주를 대상으로 항생제 감수성 검정을 수행한 결과 cephalosproinate 계열의 항생제인 ceftazidime, ceftriaxone에 과 quinolone 계열의 항생제인 ciprofloxacin에서 94.1%의 내성률이 나타났다.
- 아. *Pseudomonas spp.* 29균주를 대상으로 항생제 감수성 검정을 수행한 결과 cefotaxime이 96.6%로 가장 높았으며 ampicillin이 93.1%로 가장 높았으며 chloramphenicol(79.3%), azithromycin(72.4%), tetracycline(51.7%), imipenem (10.3%), ciprofloxacin (3.4%) 순서로 내성률을 보였다.
- 자. 분리 동정된 유해미생물의 항생제 내성률을 시료별로 분석한 결과 계분에서 분리된 *E. coli*가 다른 시료에 비해 높게 나타났고 특히 ampicillin, chloramphenicol, ciprofloxacin, nalidixic acid, tetracycline에 대해 내성률이 높으며, *K. pneumoniae*는 시료와 상관없이 공통적으로 gentamicin에 내성률이 높았으며, 돈분에서 분리된 균주에서 ceftriaxone과 tetracycline 내성률이 높았다.
- 차. 축종에 따라 항생제 내성률이 다르게 나타났으며, 특히 계분 유래 퇴비에서 전반적으로 항생제 내성률이 높게 나타났다.

<시험 2> 축분퇴비 부숙도와 유해미생물 상관관계 구명

- 가. 2022~2023년 동안 총 102건의 자가제조 퇴비 및 10건의 시판퇴비를 분석한 결과, 일반세균 밀도는 우분(6.52~9.58 log CFU/g), 돈분(5.47~9.73 log CFU/g), 계분(4.83~10.15 log CFU/g), 시판퇴비(5.26~7.76 log CFU/g)로 나타났으며, 시판퇴비가 가장 낮은 미생물 분포를 보였다.
- 나. 대장균군 검출율은 우분 60.0%, 돈분 76.7%, 계분 37.8%였으며, 시판퇴비에서는

- 불검출되었고, 대장균은 우분 62.9%, 돈분 40.0%, 계분 24.3%에서 검출되었다. 부숙이 불충분한 시료에서 높은 대장균군·대장균 밀도 및 NH₃농도가 확인되었다.
- 다. 부숙도 80~100% 시료에서는 대장균군이 대부분 불검출된 반면, 부숙도 20~40% 시료에서는 높은 대장균군 오염도(3.00~9.06 log CFU/g)가 관찰되었다.
- 라. 높은 부숙도(80~100%) 시료는 낮은 NH₃ 농도(0~25ppm), 낮은 부숙도(20~40%) 시료는 높은 NH₃ 농도(50~400ppm)를 보였다.
- 마. 부숙완료 시료는 미생물 밀도와 가스 농도가 모두 낮아지는 경향을 나타냈다. 이는 퇴비의 부숙도가 미생물학적 안전성과 밀접한 관련이 있음을 시사하며, 충분한 부숙 과정이 병원성 미생물 제거에 핵심적인 역할을 한다는 결론을 도출할 수 있다.

<시험 3> 축분퇴비 유해미생물 저감기술 개발

- 가. 모든 처리구에서 혼합 1일 후 퇴비 내부 온도가 65~75℃ 까지 상승했으며, 뒤집기 직후마다 약 60℃ 까지 다시 상승하는 패턴을 보였다.
- 나. 부숙도 진행 분석 결과, 모든 처리구는 1~2차 뒤집기까지 부숙초기 단계였으나, 3차 뒤집기 이후 부숙완료 상태에 도달하였다.
- 다. 부숙 완료 시점의 암모니아 농도는 뒤집기+송풍 처리구에서 가장 낮은 22.5ppm을 기록했으며, 뒤집기 처리구는 27.5ppm, 무처리 대조구는 50ppm으로 가장 높게 나타났다.
- 라. 대장균군은 퇴비화 후 뒤집기+송풍 처리구에서만 불검출되었고(대조구: 2.29 log CFU/g, 뒤집기만: 3.49 log CFU/g), 대장균은 모든 처리구에서 검출되지 않아 뒤집기+송풍 처리가 가장 위생적인 것으로 확인되었다.

5. 인용문헌

- Ahn T. E., Kim D. M., Lee H. S., Shin H. S., and Chung E. G. 2021. A Study on the Nutrient Composition and Heavy Metal Contents in Livestock Manure Compost · Liquefied Fertilizer. J. Korean Society on Water Environment. 37(4) : 306-314.
- CLSI (Clinical Laboratory Standards Institute). 2020. Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing, 30th edition CLSI supplement M100. Wayne, PA, USA.
- Hong C. K., Seo Y. H., Choi C. M., Hwang I. S., and Kim M. S. 2012. H., Kim, K. H., Yun, J. C., and Heu., S. G. 2012. Microbial Quality of Fresh Vegetables and Fruits in Seoul, Korea. J. Fd Hyg. Safety. 27(1) : 24-29.
- Jeon J. H., Roh J. H., Lee C. L., Kim G. H., Lee J. Y., and Yoon K. S. 2022. Microbial Qualities of Parasites and Foodborne Pathogens in Ready to Eat



(RTE) Fresh-cut Produce at the On/Offline Markets. J. Food Hyg. Safety. 37(2) : 87-96.

Jones, R. N., N. M. Holliday, and P. R. Rhomberg. 2015. Validation of a commercial dry form broth microdilution device (sensititre) for testing tedizolid, a new oxazolidinone. J. Clin. Microbiol. 53(2): 657-659.

Kim D. W., N. Y. S. Kim, C. R. Kim, M.-I. Jeong, K. K. Oh, B.-E. Kim, J.-G. Ryu, J. E. Jung, S. N. Jee, and K.-Y. Ryu. 2021. Investigation of Antimicrobial Minimum Inhibitory Concentration of Pectobacterium spp. Isolated from Agricultural Produce. Korean J. Pestic. Sci. 25(4): 1-10.

Kim S., Sung, H., Jeon, H. S., Park, S. J., Park, S. H., and Kim, M. N. 2007. Evaluation of a Rapid Enrichment-PCR Method for the Detection of vanA Vancomycin-resistant Enterococci in Fecal Specimens. Korean J Clin Microbiol. 10: 44-48.

Krueger, M., W. Schroedl, K. Isik, W. Lange, and L. Hageman. 2002. Effect of lactulose on the intestinal microflora of periparturient sows and their piglets. Eur. J. Nut. 41:26-31.

Larney, F.J., L.J. Yanke, J.J. Miller, and T.A. McAllister. 2003. Fate of coliform bacteria in composted beef cattle feedlot manure. J. Environ. Qual. 32 : 1508-1515.

Salanitro, J.P., I.G. Blake, and P.A. Muirhead. 1997. Isolation and identification of fecal bacteria from adult swine. Appl. Environ. Microbiol. 33:79-84.

6. 연구결과 활용제목

- 안전농산물 생산을 위한 계분퇴비 자가 제조시 뒤집기 및 송풍 효과('24, 영농활용)

7. 연구원 편성

세부과제	구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도		
						'22	'23	'24
축분퇴비 유해미생물 조사 및 안전관리 기술 개발	책임자	환경농업 연구과	농업연구사	한정아	세부과제 총괄	○	○	○
	공동연구자	친환경생물연구소	〃	최종인	미생물 분석	○	○	-
		환경농업연구과	〃	윤승환	미생물 분석	○	○	○
		〃	〃	조동현	시료 채취	○	○	○
		작물연구과	농업연구관	임성희	성적 분석	-	-	○
〃	환경농업연구과	〃	심상연	성적 분석	○	○	-	
〃	〃	〃	박중수	연구자문	○	○	○	