



| 과제구분 | 기관고유 | 수행시기 | | 전반기 | |
|-----------------------------|-----------------------|------|---------|---------|-----|
| 연구과제 및 세부과제명 | | 연구분야 | 수행기간 | 연구실 | 책임자 |
| 환경보전형 친환경 토양 및 시비관리 연구 | | 농업환경 | '20~'25 | 환경농업연구과 | 소호섭 |
| 경축순환농업 추진단지 토양 및 벼 생육 특성 구명 | | 농업환경 | '23~'25 | 환경농업연구과 | 서재순 |
| 색인용어 | 경축순환농업, 우분퇴비, 논 토양, 벼 | | | | |

ABSTRACT

This study was conducted from 2023 to 2025 to evaluate the effects of crop-livestock cycling agriculture using cattle manure compost on soil chemical properties and rice growth in paddy fields of Gyeonggi Province. The project area expanded continuously during the study period, although the actual compost-applied area was smaller than the registered area due to limited machinery access, excessive soil organic matter content, and restricted areas such as river basins. The mean soil chemical properties of paddy fields in the project area during 2023–2025 were pH 6.5, organic matter 21g kg^{-1} , available phosphate 126mg kg^{-1} , available silicate 218mg kg^{-1} , and exchangeable K, Ca, and Mg levels of 0.48, 6.1, and 1.6cmolc kg^{-1} , respectively. Overall, soil chemical properties were within the proper range, although some cities and counties showed relatively high levels of available phosphate and exchangeable K. Three-way ANOVA showed that sampling time and year had greater overall effects on soil chemical properties than compost application, while compost application significantly affected pH, available phosphate, available silicate, and exchangeable K. In rice, compost application did not significantly affect growth traits at maturity, yield components, lodging, or the proportion of leaves damaged by diseases and insect pests. However, rice yield and head rice yield were significantly affected by compost application, whereas cultivar and weather conditions accounted for a larger proportion of the overall variation. No significant interaction effects among factors were detected. These results indicate that crop-livestock cycling agriculture using cattle manure compost at the standard application rate can be stably adopted in paddy rice cultivation. Although no substantial overall differences were observed in soil chemical properties, rice growth, or grain quality compared with conventional practice, some soil chemical properties and yield-related traits were affected by compost application.

Key words: Crop-livestock Cycling Agriculture, Cattle Manure Compost, Paddy Soil, Rice

1. 연구목표

가축분뇨의 해양배출은 2012년부터 전면 금지되었으며, 이후 국내 축산업에서는 가축분뇨의 육상 처리와 농업적 활용을 통한 자원화가 필수 과제로 자리 잡게 되었다. 정부도 이러한 여건 변화에 대응하여 가축분뇨의 퇴·액비화를 중심으로 한 자연순환농업 기반 구축과 자원화 시설 확충을 지속적으로 추진해 왔다. 특히 농림축산식품부는 해양배출 금지와 환경규제 강화에 따라 고품질 퇴·액비의 생산·유통·관리체계 구축 필요성을 제시하였고(농림축산식품부, 2013), 농어업·농어촌특별위원회는 2019년 ‘지역자원 기반 경축순환농업 활성화 방안’을 의결하여 지역단위의 가축분뇨 자원화, 토양양분관리, 경종-축산 연계 강화를 정책 방향으로 제시한 바 있다. 이러한 경축순환농업은 가축분뇨와 농업부산물을 지역 내 자원으로 순환시켜 환경부하를 줄이고 화학비료 의존도를 완화하며, 지속가능한 농업체계 구축에 기여할 수 있는 대안으로 평가된다(한국농촌경제연구원, 2020).

농림축산식품부의 2023년 축산환경조사에 따르면, 연간 가축분뇨 발생량은 50,871천톤으로 추정되며, 이 가운데 상당 부분이 퇴비와 액비 형태로 자원화되고 있다. 경기도는 전국 1위 젓소 사육지역으로 2024년 기준 젓소 154천두를 사육하여 전국의 40.4%를 차지하는 것으로 보고되었다(경기도원, 2024). 이처럼 경기도는 젓소 사육 비중이 높아 우분 발생량과 자원화 수요가 매우 큰 지역적 특성이 있다. 우분은 다른 축종 분뇨에 비해 상대적으로 고품분 비율이 높아 퇴비 원료로 널리 활용되며, 퇴비화에 비교적 유리한 자원이다. 또한 가축분퇴비와 우분퇴비의 시용은 토양 유기탄소 및 유기물 증진, 토양화학성 개선, 일부 작물에서의 생산성 향상과 화학비료 대체 가능성 측면에서 긍정적인 효과가 보고된 바 있다(Lee et al., 2014; Lee et al., 2021). 그러나 한편으로는 과다 시용 시 토양화학성이 달라질 수 있고, 이에 따라 작물 생육과 수량이 달라질 수 있음이 지적되기도 하였다(Ko et al., 2021).

경축순환농업 추진단지와 같이 실제 현장 여건에서 우분 중심의 자원화가 논 토양과 벼 생육에 미치는 영향을 종합적으로 검증한 연구는 아직 제한적이다. 따라서 현장 기반의 실증자료 축적은 경축순환농업의 확대 적용과 정책적 정착을 위해 중요하다. 이에 본 연구는 경기도 경축순환농업 추진단지를 대상으로 우분퇴비 살포가 논 토양화학성과 벼 생육에 미치는 영향을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 경축순환농업 추진단지 토양화학성

경축순환농업 참여 신청농지와 살포농지에 대한 정보는 경기도 경축순환농업 주관 부서인 경기도청 친환경연구과의 협조를 통해 받았으며, 경축순환농업 필지의 토양화학성 정보는 신청 농지의 소재지 농업기술센터 및 ‘흙토람’에 업로드된 자료를 수집하였다. 우분퇴비 살포 유무에 따른 영향을 비교하기 위하여 같은 지역의 살포지와 미살



포지는 가까운 필지로 선정하여 2023년 용인, 화성에서 5필지, 2024년 평택, 화성에서 5필지, 2025년 평택에서 4필지를 조사하였다. 토양화학성은 농업환경 실험분석법(경기도원, 2018)에 준하여 분석하였다.

나. 벼 생육 및 미질

우분퇴비 살포 유무에 따른 조사필지에는 2023년 추청, 삼광, 골드퀸, 2024년 참드림, 2025년 꿈마지, 진옥 품종이 재배되었으며 각 조사지역의 재배 품종, 이앙일, 기비 정보는 표 1~3과 같았다. 벼의 생육, 수량구성요소 및 쌀 수량 등 주요 농업적 형질 조사는 농업과학기술 연구조사 분석기준(농진청, 2012)에 준하여 조사하였으며, 쌀 품위는 RGQI100B(Satake, Japan), 기계적 식미치는 STA1B(Satake, Japan), 단백질 함량은 Infratec 1241 Grain Analyzer(Foss, Denmark)로 분석하였다.

다. 삼원분산분석

삼원분산분석은 퇴비 살포 효과와 함께 품종, 조사시점 및 기상조건이 반응변수에 미치는 영향을 검정하고, 각 요인 간 상호작용 여부를 확인하기 위하여 수행하였다. 토양화학성 관련 형질은 퇴비 살포 여부, 조사시점(시험 전, 수확 후) 및 기상(연도)을 독립요인으로 하였고, 벼 생육 및 수량 관련 형질은 퇴비 살포 여부, 품종 및 기상(연도)을 독립요인으로 하였다. 퇴비 살포 여부와 조사시점은 각각 2수준으로 구분하였으며, 품종은 연도별 공시 품종, 기상은 시험연도를 기준으로 설정하였다. 모든 분석은 일반선형모형을 이용하여 주 효과와 상호작용 효과를 포함한 모형으로 하였으며, 유의성은 $p < 0.05$ 수준에서 판정하였다. 통계적 유의성은 * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, (∇) $p \approx 0.1$ 및 n.s.로 표시하였다.

표 1. 2023년 경축순환농업 조사지역 이앙 및 비료 시비

| 조사 지역 | 퇴비 살포 | 이앙일 (월.일) | 품 종 | 기 비 | | 성분별 기비 시비량(kg 10a ⁻¹) | | |
|-------|-------|-----------|-----|--------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----|-----|
| | | | | 비료 종류 | 시비량 (kg 10a ⁻¹) | N | P | K |
| 용인A | 살포 | 5.12 | 추청 | 유비롱 (18-9-8) | 30 | 5.4 | 2.7 | 2.4 |
| 용인B | 미살포 | 5.15 | 삼광 | 유비롱 (18-9-8) | 30 | 5.4 | 2.7 | 2.4 |
| 화성C | 살포 | 5.18 | 골드퀸 | 원타임 (29-4-6) | 47 | 13.6 | 1.9 | 2.8 |
| 화성D | 살포 | 5.18 | 골드퀸 | 원타임 (29-4-6) | 47 | 13.6 | 1.9 | 2.8 |
| 화성E | 미살포 | 6. 1 | 골드퀸 | 원타임 (29-4-6) | 47 | 13.6 | 1.9 | 2.8 |

표 2. 2024년 경축순환농업 조사지역 이앙 및 비료 시비

| 조사 지역 | 퇴비 살포 | 이앙일 (월.일) | 품 종 | 기 비 | | 성분별 기비 시비량(kg 10a ⁻¹) | | |
|-------|-------|-----------|-----|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----|-----|
| | | | | 비료 종류 | 시비량 (kg 10a ⁻¹) | N | P | K |
| 평택A | 살포 | 5. 13 | 참드립 | 일회만290 (22-9-10) | 40 | 8.8 | 3.6 | 4.0 |
| 평택B | 미살포 | 5. 13 | 참드립 | 일회만290 (22-9-10) | 40 | 8.8 | 3.6 | 4.0 |
| 화성C | 살포 | 5. 18 | 참드립 | 이편한 (26-6-7) | 34 | 8.8 | 2.0 | 2.4 |
| 화성D | 살포 | 5. 18 | 참드립 | 이편한 (26-6-7) | 34 | 8.8 | 2.0 | 2.4 |
| 화성E | 미살포 | 5. 18 | 참드립 | 이편한 (26-6-7) | 34 | 8.8 | 2.0 | 2.4 |

표 3. 2025년 경축순환농업 조사지역 이앙 및 비료 시비

| 조사 지역 | 퇴비 살포 | 이앙일 (월.일) | 품 종 | 기 비 | | 성분별 기비 시비량(kg 10a ⁻¹) | | |
|---------|-------|-----------|-----|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----|-----|
| | | | | 비료 종류 | 시비량 (kg 10a ⁻¹) | N | P | K |
| 평택 오성 A | 살포 | 5.15 | 꿈마지 | 맞춤18호 (21-13-9) | 18 | 3.8 | 2.3 | 1.6 |
| 평택 오성 B | 미살포 | 5.15 | 꿈마지 | 맞춤18호 (21-13-9) | 40 | 8.4 | 5.2 | 3.6 |
| 평택 청북 A | 살포 | 5.22 | 진옥 | 명품유비롱 (18-9-8) | 8 | 1.4 | 0.7 | 0.6 |
| 평택 청북 B | 미살포 | 5.22 | 진옥 | 명품유비롱 (18-9-8) | 14 | 2.5 | 1.3 | 1.1 |

3. 결과 및 고찰

가. 경축순환농업 추진단지 우분퇴비 살포 현황

경기도의 경축순환농업은 농수산생명과학국, 축산동물복지국 및 농업기술원이 협력하여 추진하였다. 농수산생명과학국에서는 경축순환농업단지 수요조사, 살포결과 안내 등 업무총괄을 하고, 축산동물복지국에서는 신청단지 인근 축산농가 선정하여 퇴비 살포와 경운 업무를, 농업기술원은 가축분퇴비 부숙도 검정을 지원하고, 퇴비 살포에 의한 작물재배 효과분석을 수행하였다. 2023년부터 2025년까지 경기도 경축순환농업 추진단지의 우분퇴비 살포 신청 면적은 지속적으로 증가하는 경향을 보였다(표 4). 전체 신청 면적은 2023년 948.8ha에서 2025년 1,763.4ha로 확대되었으며, 실제 우분퇴비가 살포된 면적은 각각 894.0ha, 850.9ha, 1,078.4ha로 나타났다. 실제로 우분퇴비가 살포되는 시기는 벼 재배 전년도 11월부터 당해년 4월이므로 2022년 11월부터 2025년 4월까지의 기상을 경기도 화성시 진안동을 기준으로 살펴보았다(그림 1).



퇴비 살포기는 우천 시 장비를 투입할 수 없는데, 2024년 11월과 2025년에 높은 강수량을 보였다. 이로 인해 2025년에는 다른 해에 비해 경축순환농업 신청 농지에 비해 퇴비 살포 면적이 적어졌음을 알 수 있었다. 우천에 따른 장비 투입 불가 외의 주요 미살포 사유는 주로 토양 유기물 함량 초과, 하천구역 등 살포 제한 지역에 해당하는 경우였다.

표 4. 2023~2025년 경축순환농업 추진단지 현황

| 시군 | '23년(7개 시·군) | | '24년(4개 시·군) | | '25년(8개 시·군) | |
|-----|--------------|-------|--------------|-------|--------------|---------|
| | 신청 | 살포 | 신청 | 살포 | 신청 | 살포 |
| 화성시 | 680.2 | 678.3 | 637.5 | 637.5 | 1,337 | 771.0 |
| 평택시 | 169.6 | 169.6 | 277.7 | 174.7 | 217.2 | 190.6 |
| 용인시 | 62.3 | 34.1 | 65.5 | 19.4 | 24.5 | 2.2 |
| 이천시 | 5.0 | 5.0 | 19.3 | 19.3 | 32.4 | 32.4 |
| 연천군 | 1.6 | 1.6 | - | - | 39.2 | 20.0 |
| 포천시 | 19.0 | - | - | - | - | - |
| 양주시 | 11.1 | 5.4 | - | - | - | - |
| 가평군 | - | - | - | - | 47.4 | 43.5 |
| 파주시 | - | - | - | - | 25.2 | 0.8 |
| 고양시 | - | - | - | - | 40.5 | 17.9 |
| 합계 | 948.8 | 894.0 | 1,000.0 | 850.9 | 1,763.4 | 1,078.4 |

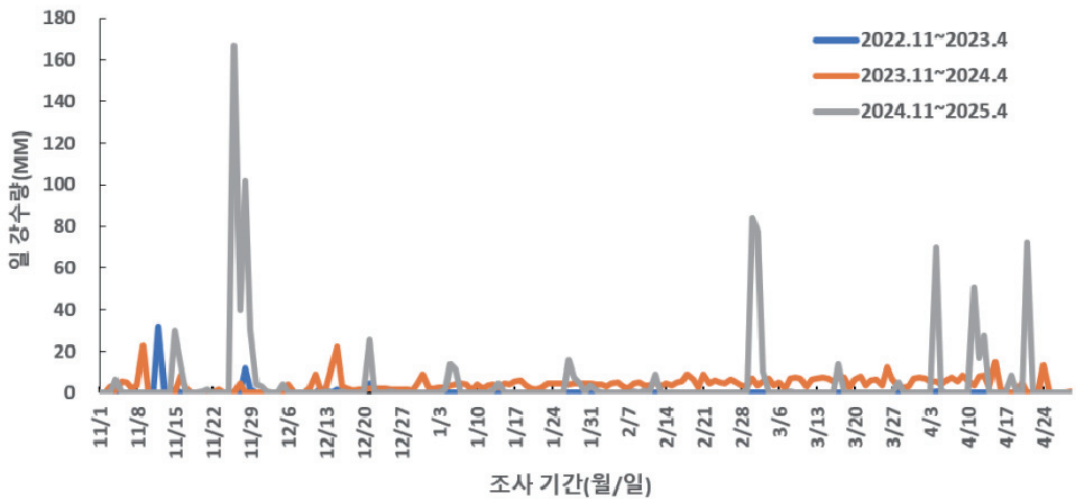


그림 1. 벼 재배기간 중 일 강수량(2022~2025)



나. 경축순환농업 추진단지 논 토양화학성

경축순환농업 추진단지의 가축분 살포기준은 토양유기물 함량이 20g/kg이하는 1.6톤/10a, 20~30g/kg은 1.2톤/10a 우분퇴비를 살포하고, 30g/kg초과는 미살포하였다. 이는 벼 재배에서 퇴구비 시용량을 토양유기물 20g/kg 미만은 1,600kg/10a, 21~30g/kg는 1,200kg/10a로 제시하고 있는 농촌진흥청 「무기질비료 사용안내서」에 따른 것이다. 경기도농업기술원에서 2023년부터 2024년도까지 수행한 「우분퇴비 시용량에 따른 벼 생육 및 미질특성 구명」 시험에서 우분퇴비를 2배 이상 연용할 경우 유효인산과 교환성 칼륨이 과다해지고 수질 악화와 쌀 품질 저하 우려가 있다고 하였으므로 토양양분 과잉과 환경부하를 예방하기 위한 관리기준이기도 하다.

이 기준에 맞춰 가축분퇴비를 살포한 2023~2025년 경축순환농업 추진단지 논 토양의 화학성을 조사한 결과, 평균 pH와 유기물 함량은 벼 재배 적정범위에 대체로 포함되어 토양 상태는 전반적으로 양호하였으며, 유효규산 또한 대부분 기준 이상으로 나타나 벼 생육에 유리한 조건을 보였다. 그러나 유효인산과 치환성 칼륨은 일부 지역에서 적정범위를 초과하여 집적 경향이 확인되었고, 반대로 일부 필지에서는 유기물과 규산이 부족한 양상도 나타났다. 따라서 경축순환농업 추진단지에서는 우분퇴비 시용이 토양 유기물 유지에 긍정적으로 작용하였으나, 장기 시용에 따른 인산 및 칼륨 과잉 축적 가능성에 대한 관리가 필요할 것으로 보인다. 이는 우분퇴비가 비옥도 개선에 유리(Das S. et al. 2017)하나, 과다시용이나 연용은 토양 EC와 가용성 이온이 증가할 수 있다는 보고(Hao X. et al., 2003)와 일맥상통한다.

표 5. 2023년 경축순환농업 추진단지 논 토양화학성

| 시 군 | 필지수 (개) | pH (1:5) | OM (g kg ⁻¹) | Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) | Av.SiO ₂ (mg kg ⁻¹) | Ex. Cations(cmolc kg ⁻¹) | | |
|------|------------|-------------|-----------------------------|--|---|--------------------------------------|---------|---------|
| | | | | | | K | Ca | Mg |
| 화성시 | 368 | 6.5 | 22 | 187 | 244 | 0.70 | 5.7 | 3.2 |
| 평택시 | 166 | 6.2 | 24 | 145 | 274 | 0.60 | 7.4 | 2.0 |
| 용인시 | 104 | 6.3 | 20 | 75 | 166 | 0.29 | 6.8 | 1.2 |
| 양주시 | 32 | 6.0 | 22 | 203 | 94 | 0.27 | 3.7 | 0.7 |
| 이천시 | 10 | 6.7 | 12 | 65 | 217 | 0.25 | 5.4 | 0.8 |
| 연천군 | 3 | 6.5 | 29 | 63 | 133 | 0.70 | 6.3 | 1.7 |
| 평 균 | - | 6.4 | 22 | 123 | 188 | 0.47 | 5.9 | 1.6 |
| 적정범위 | | 5.5~6.5 | 20~30 | 80~120 | 157이상 | 0.2~0.3 | 5.0~6.0 | 1.5~2.0 |

표 6. 2024년 경축순환농업 추진단지 논 토양화학성

| 시 군 | 필지수 (개) | pH (1:5) | OM (g kg ⁻¹) | Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) | Av.SiO ₂ (mg kg ⁻¹) | Ex. Cations(cmolc kg ⁻¹) | | |
|------|------------|-------------|-----------------------------|--|---|--------------------------------------|---------|---------|
| | | | | | | K | Ca | Mg |
| 화성시 | 368 | 6.5 | 22 | 186 | 244 | 0.70 | 5.7 | 3.2 |
| 평택시 | 190 | 6.4 | 25 | 133 | 275 | 0.61 | 7.5 | 1.8 |
| 용인시 | 68 | 6.6 | 19 | 72 | 221 | 0.34 | 7.7 | 1.3 |
| 이천시 | 13 | 6.5 | 18 | 70 | 222 | 0.24 | 5.6 | 1.0 |
| 평 균 | - | 6.5 | 21 | 115 | 240 | 0.47 | 6.6 | 1.8 |
| 적정범위 | | 5.5~6.5 | 20~30 | 80~120 | 157이상 | 0.2~0.3 | 5.0~6.0 | 1.5~2.0 |

표 7. 2025년 경축순환농업 추진단지 논 토양화학성

| 시 군 | 필지수 (개) | pH (1:5) | OM (g kg ⁻¹) | Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) | Av.SiO ₂ (mg kg ⁻¹) | Ex. Cations(cmolc kg ⁻¹) | | |
|------|------------|-------------|-----------------------------|--|---|--------------------------------------|---------|---------|
| | | | | | | K | Ca | Mg |
| 화성시 | 110 | 6.7 | 21 | 67 | 244 | 1.16 | 5.5 | 3.4 |
| 평택시 | 103 | 6.7 | 22 | 116 | 355 | 0.50 | 7.3 | 1.8 |
| 용인시 | 48 | 6.2 | 24 | 97 | 138 | 0.31 | 5.6 | 1.1 |
| 이천시 | 8 | 6.4 | 13 | 137 | 182 | 0.52 | 5.7 | 1.0 |
| 가평균 | 178 | 6.3 | 28 | 272 | 309 | 0.36 | 4.6 | 0.9 |
| 고양시 | 7 | 6.9 | 15 | 58 | 280 | 0.34 | 7.6 | 1.4 |
| 파주시 | 27 | 6.1 | 16 | 141 | 146 | 0.35 | 4.5 | 1.1 |
| 연천군 | 54 | 6.4 | 23 | 227 | 148 | 0.48 | 5.1 | 1.1 |
| 평 균 | - | 6.5 | 20 | 139 | 226 | 0.50 | 5.7 | 1.5 |
| 적정범위 | | 5.5~6.5 | 20~30 | 80~120 | 157이상 | 0.2~0.3 | 5.0~6.0 | 1.5~2.0 |

다. 경축순환농업 조사필지 시험 전·후 토양화학성

2023~2025년 경축순환농업 조사필지의 재배 전·후 토양화학성을 비교한 결과(표 8~표 10), 우분퇴비 살포 필지에서는 미살포 필지에 비해 토양화학성 변화가 뚜렷하였으며, 유기물, 유효인산, 유효규산, 치환성 칼륨의 증가 경향이 확인되었다. 이는 우분퇴비가 토양 유기물 공급과 양분 보급 측면에서 긍정적 기능이 있음을 보여주나, 일부 필지에서 나타난 pH, 유효인산, 치환성 칼륨의 적정범위 초과는 반복 시용 시 토양 양분과잉 축적 가능성도 보여주었다. 미살포 필지에서도 재배 전·후 토양화학성이 일부 변동하므로 모든 변화를 우분퇴비 단독 효과로 해석하기에는 한계가 있었다.

표 8. 2023년 경축순환농업 조사필지 벼 재배 전·후 토양화학성

| 조사 시기 | 조사 지역 | 퇴비 살포 | pH (1:5) | OM (g kg ⁻¹) | Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) | Av.SiO ₂ (mg kg ⁻¹) | Ex. Cations(cmolc kg ⁻¹) | | |
|-------|-------|-------|----------|--------------------------|---|--|--------------------------------------|---------|---------|
| | | | | | | | K | Ca | Mg |
| 재배 전 | 용인A | 살포 | 5.7 | 23 | 81 | 117 | 0.30 | 3.5 | 1.0 |
| | 용인B | 미살포 | 5.8 | 29 | 23 | 146 | 0.10 | 4.8 | 1.1 |
| | 화성C | 살포 | 6.9 | 20 | 61 | 302 | 0.90 | 6.6 | 4.4 |
| | 화성D | 살포 | 6.5 | 22 | 57 | 244 | 0.93 | 6.6 | 4.5 |
| | 화성E | 미살포 | 5.8 | 26 | 48 | 171 | 1.04 | 5.6 | 5.1 |
| 수확 후 | 용인A | 살포 | 6.2 | 26 | 192 | 405 | 0.21 | 4.2 | 0.7 |
| | 용인B | 미살포 | 5.8 | 29 | 23 | 146 | 0.10 | 4.8 | 1.1 |
| | 화성C | 살포 | 7.3 | 22 | 58 | 520 | 1.09 | 6.2 | 4.4 |
| | 화성D | 살포 | 6.8 | 27 | 78 | 575 | 1.19 | 6.8 | 4.2 |
| | 화성E | 미살포 | 6.4 | 24 | 55 | 188 | 0.92 | 5.1 | 4.9 |
| 적정범위 | | | 5.5~6.5 | 20~30 | 80~120 | 157이상 | 0.2~0.3 | 5.0~6.0 | 1.5~2.0 |

표 9. 2024년 경축순환농업 조사필지 벼 재배 전·후 토양화학성

| 조사 시기 | 조사 지역 | 퇴비 살포 | pH (1:5) | OM (g kg ⁻¹) | Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) | Av.SiO ₂ (mg kg ⁻¹) | Ex. Cations(cmolc kg ⁻¹) | | |
|-------|-------|-------|----------|--------------------------|---|--|--------------------------------------|---------|---------|
| | | | | | | | K | Ca | Mg |
| 재배 전 | 평택 A | 살포 | 7.9 | 23 | 118 | 321 | 0.84 | 9.3 | 3.7 |
| | 평택 B | 미살포 | 6.7 | 22 | 134 | 73 | 0.37 | 5.1 | 1.5 |
| | 화성 C | 살포 | 7.6 | 22 | 46 | 623 | 1.06 | 5.8 | 4.3 |
| | 화성 D | 살포 | 6.7 | 23 | 44 | 279 | 1.30 | 5.8 | 4.1 |
| | 화성 E | 미살포 | 6.7 | 24 | 41 | 209 | 0.97 | 4.8 | 4.9 |
| 수확 후 | 평택 A | 살포 | 7.3 | 23 | 122 | 375 | 0.75 | 8.8 | 3.3 |
| | 평택 B | 미살포 | 6.4 | 21 | 153 | 84 | 0.34 | 5.5 | 1.5 |
| | 화성 C | 살포 | 7.5 | 33 | 230 | 1,582 | 1.34 | 8.0 | 3.9 |
| | 화성 D | 살포 | 7.2 | 26 | 75 | 627 | 1.07 | 6.3 | 3.6 |
| | 화성 E | 미살포 | 5.6 | 24 | 29 | 148 | 0.76 | 4.9 | 4.0 |
| 적정범위 | | | 5.5~6.5 | 20~30 | 80~120 | 157이상 | 0.2~0.3 | 5.0~6.0 | 1.5~2.0 |

표 10. 2025년 경축순환농업 조사필지 벼 재배 전·후 토양화학성

| 조사 시기 | 조사 지역 | 퇴비 살포 | pH (1:5) | OM (g kg ⁻¹) | Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) | Av.SiO ₂ (mg kg ⁻¹) | Ex. Cations(cmolc kg ⁻¹) | | |
|-------|---------|-------|----------|--------------------------|---|--|--------------------------------------|---------|---------|
| | | | | | | | K | Ca | Mg |
| 재배 전 | 평택 오성 A | 살포 | 7.6 | 27 | 192 | 1,110 | 0.50 | 8.7 | 1.6 |
| | 평택 오성 B | 미살포 | 6.7 | 33 | 207 | 679 | 0.51 | 8.6 | 1.5 |
| | 평택 청북 A | 살포 | 7.2 | 24 | 259 | 632 | 1.07 | 5.8 | 3.8 |
| | 평택 청북 B | 미살포 | 6.4 | 24 | 34 | 358 | 0.61 | 4.6 | 2.1 |
| 수확 후 | 평택 오성 A | 살포 | 6.8 | 35 | 286 | 402 | 0.72 | 9.9 | 1.9 |
| | 평택 오성 B | 미살포 | 6.4 | 39 | 274 | 443 | 0.52 | 9.6 | 1.7 |
| | 평택 청북 A | 살포 | 7.1 | 30 | 268 | 367 | 1.00 | 6.8 | 3.5 |
| | 평택 청북 B | 미살포 | 6.2 | 23 | 32 | 373 | 0.61 | 5.2 | 2.3 |
| 적정범위 | | | 5.5~6.5 | 20~30 | 80~120 | 157이상 | 0.2~0.3 | 5.0~6.0 | 1.5~2.0 |

표 8~표 10의 결과가 우분퇴비 단독효과로 해석하기에 한계가 있음에 따라 우분퇴비 살포외의 조건인 조사시점(시험 전 vs. 수확 후), 연도를 포함하여 삼원분산분석(three-way ANOVA)을 수행하였다. 그 결과(표 11), 논 토양화학성 변화는 퇴비 살포 효과보다 조사 시기와 연도의 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 퇴비 살포 단독 효과는 pH, 유효인산, 유효규산 및 치환성 칼륨 등 일부 항목에서 유의성을 보였으나, 전반적으로는 조사 시기와 연도의 영향이 더 크게 나타났다. 따라서 논 토양화학성 변화는 퇴비 살포 효과만으로 설명하기 어렵고, 재배 시기와 연차 간 기상조건의 영향을 함께 고려할 필요가 있다.

표 11. 가축분퇴비 살포유무×조사시기(시험 전 vs. 수확 후)×연도 삼원분산분석 (three-way ANOVA) 결과

| 요인 | pH | OM | Av.P ₂ O ₅ | Av.SiO ₂ | Ex. Cations | | |
|-------------|------|------|----------------------------------|---------------------|-------------|------|------|
| | | | | | K | Ca | Mg |
| 퇴비 | * | n.s. | ** | * | * | n.s. | n.s. |
| 조사 시기 | ** | n.s. | ** | ** | n.s. | n.s. | n.s. |
| 연도 | ** | ** | ** | ** | n.s. | ** | ** |
| 퇴비×조사 시기 | n.s. | n.s. | * | * | n.s. | n.s. | n.s. |
| 퇴비×연도 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| 조사 시기×연도 | n.s. | n.s. | ** | ** | n.s. | n.s. | n.s. |
| 퇴비×조사 시기×연도 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |

라. 벼 재배 기간 중 기상 조건

표 11에서 보는 바와 같이 연도가 퇴비살포나 벼 재배 효과보다 논 토양화학성에 큰 영향을 주었는데 그 원인을 찾기 위해 2023년부터 2025년의 기상을 조사하였다. 우분퇴비 살포가 이루어진 벼 재배 전년도 11월부터 당해년 4월까지의 기상 조건은 연도별로 차이를 보였다. 조사기간 동안의 최저기온과 일 강수량의 변동 폭이 컸으며, 특히 강수량은 특정 시기에 집중되는 경향을 나타냈다(그림 1). 일반적으로 우분퇴비를 포함한 유기성 자재의 살포 시기와 강우 발생 간격은 양분 유실 위험과 이용효율에 큰 영향을 미치며, 토양 수분과 온도 조건은 유기물 분해와 무기화를 좌우하므로, 이 기간의 기상 변동은 우분퇴비 살포 시기와 토양 조건에 영향을 미쳤을 것으로 예측된다.

또한 벼 재배 기간의 기상 조건은 연도별로 큰 차이를 보였다(그림 2, 표 12). 2023년은 평균기온이 상대적으로 낮았으며, 강우일수와 누적 강수량이 적은 해였고, 2024년은 35℃ 이상의 고온 일수가 다른 해에 비해 적은 해였으며, 2025년은 35℃ 이상의 고온 일수와 강우 일수가 가장 많으며, 누적 강수량도 가장 높은 해였다. Satake와 Yoshida(1978)는 벼 개화기에 8시간/일 처리 조건에서 20% 불임을 유발하는 임계온도를 내열성 품종 36.5℃, 감수성 품종 32℃로 제시하였고, Liu 등(2023)은 벼 개화기 임계 고온을 평균 $37.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 로 제시한 바 있다. 또한 농촌진흥청 농사로에서는 벼 개화기 35℃ 이상의 고온은 폭염 피해 가능 구간으로 수정실패(불임)로 이어져 수량 저하 및 품질 저하로 연결될 수 있다고 하였다. 따라서 벼 재배기간 중 기온과 강우의 변동은 생육단계별 수분환경과 생리반응에 영향을 주어 생육 및 수량 형성에 관여했을 가능성이 있다.

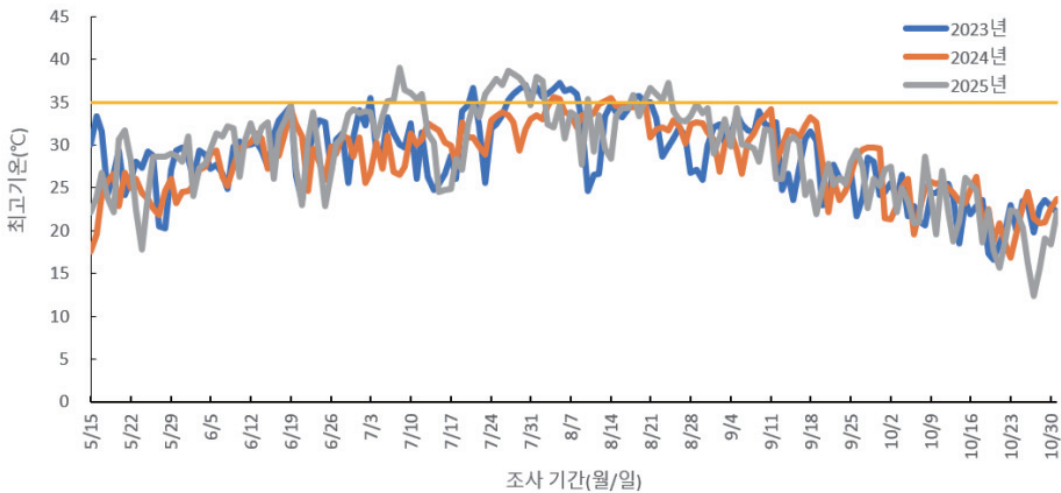


그림 2. 벼 재배기간 중 일 최고기온(2023~2025)



표 12. 벼 재배 기간 중 기온과 강우

| 연도 | 기온 | | | 강우 | |
|------|----------|----------|---------------|----------|------------|
| | 평균기온(°C) | 최고기온(°C) | 35°C 이상 일수(일) | 강우 일수(일) | 누적 강수량(mm) |
| 2023 | 23.2 | 37.3 | 17 | 69 | 668 |
| 2024 | 24.0 | 35.6 | 4 | 93 | 1,159 |
| 2025 | 23.9 | 39.0 | 24 | 117 | 6,441 |

※ 기상 조사 지역 및 조사기간: 화성, 5.15~10.30

마. 벼 생육 특성 및 수량 구성 요소

우분퇴비 살포가 벼 생육과 수량 형성에 영향을 주었는지 조사한 결과(표 13), 우분퇴비 살포 논과 미살포 논의 성숙기 벼 생육 특성(간장, 수장, 수수)은 연도 및 품종에 따라 차이를 보였으나, 퇴비 살포 여부에 따른 일관된 차이는 관찰되지 않았다. 성숙기 생육과 수량구성요소에 영향을 준 주요 요인은 퇴비 살포 유무, 조사연도(기상), 벼 품종으로 추정되어 이 3가지 요인으로 한 삼원분산분석을 수행하였다. 그 결과(표 14), 대부분의 생육 지표에서 퇴비 살포 효과는 유의하지 않았으며, 품종 또는 기상의 영향이 상대적으로 크게 나타났다.

표 13. 성숙기 생육 및 수량구성요소

| 연도 | 조사 지역 | 품종 | 퇴비 살포 | 재식 거리 (cm) | 간장 (cm) | 수장 (cm) | 수수 (개/주) | 수당립수 (립) | 등숙 비율 (%) | 현미 천립중 (g) |
|------|---------|-----|-------|------------|---------|---------|----------|----------|-----------|------------|
| 2023 | 용인A | 추청 | 살포 | 30×15 | 86 | 18.0 | 25.6 | 72 | 87.9 | 21.1 |
| | 용인B | 삼광 | 미살포 | 30×20 | 79 | 18.8 | 16.9 | 110 | 91.5 | 20.8 |
| | 화성C | 골드퀸 | 살포 | 30×18 | 80 | 19.2 | 25.6 | 74 | 89.7 | 22.3 |
| | 화성D | 골드퀸 | 살포 | 30×18 | 79 | 18.9 | 26.2 | 77 | 88.9 | 22.4 |
| | 화성E | 골드퀸 | 미살포 | 30×22 | 78 | 18.2 | 24.8 | 78 | 92.3 | 22.0 |
| 2024 | 평택 A | 참드림 | 살포 | 30×20 | 84 | 18.5 | 25.3 | 82 | 81.5 | 20.8 |
| | 평택 B | 참드림 | 미살포 | 30×20 | 81 | 17.9 | 26.7 | 81 | 85.8 | 21.3 |
| | 화성 C | 참드림 | 살포 | 30×18 | 80 | 19.2 | 25.3 | 77 | 88.2 | 22.0 |
| | 화성 D | 참드림 | 살포 | 31×21 | 81 | 19.9 | 22.7 | 99 | 87.0 | 21.6 |
| 2025 | 평택 오성 A | 꿈마지 | 살포 | 25×20 | 75 | 21.9 | 23.2 | 109 | 75.7 | 24.1 |
| | 평택 오성 B | 꿈마지 | 미살포 | 25×20 | 72 | 21.2 | 21.1 | 94 | 81.8 | 23.7 |

※ 2024년 화성E, 2025년 평택 청북 A, B 농가 수확으로 수량구성요소 조사 못함



표 14. 성숙기 생육 및 수량구성요소 삼원분산분석 결과

| 요인 | 간장 | 수장 | 수수 | 수당립수 | 등숙비율 | 현미 천립중 |
|----------|------|------|------|------|------|-----------|
| 퇴비 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| 품종 | ** | * | n.s. | * | ** | * |
| 기상 | * | n.s. | * | * | (∇) | * |
| 퇴비×품종 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| 퇴비×기상 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| 품종×기상 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| 퇴비×품종×기상 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |

바. 쌀 수량 및 미질 특성

퇴비 살포가 쌀 수량과 미질에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 조사한 결과(표 15), 2023년과 2024년의 경우, 퇴비 미살포지는 살포지보다 완전립비율은 높았으나 쌀수량과 완전미수량은 적었고, 단백질 함량도 낮았다. 이는 미살포지에서 양분 공급이 제한되어 외관상 완전립 형성 비율은 상대적으로 높게 유지될 수 있었으나, 전체 수량 확보와 단백질 축적에는 불리하게 작용하였던 것으로 파악된다. 반면, 2025년에는 살포지에서 쌀수량과 완전립비율이 모두 높아 완전미수량이 증가하였고, 단백질 함량은 미살포지와 차이가 없었다.

표 15. 수량 및 백미 품질

| 연도 | 조사 지역 | 품종 | 퇴비 살포 | 쌀수량 | | 완전립 비율 (%) | 완전미 수량 (kg/10a) | 단백질 (%) |
|------|---------|-----|-------|--------|-----|------------|-----------------|---------|
| | | | | kg/10a | 지수 | | | |
| 2023 | 용인A | 추청 | 살포 | 594 | 101 | 93.9 | 557 | 5.8 |
| | 용인B | 삼광 | 미살포 | 590 | 100 | 95.6 | 564 | 5.1 |
| | 화성C | 골드퀸 | 살포 | 612 | 121 | 91.8 | 562 | 6.6 |
| | 화성D | 골드퀸 | 살포 | 590 | 117 | 94.2 | 556 | 6.7 |
| | 화성E | 골드퀸 | 미살포 | 505 | 100 | 94.4 | 476 | 6.3 |
| 2024 | 평택A | 참드림 | 살포 | 596 | 100 | 86.3 | 515 | 5.3 |
| | 평택B | 참드림 | 미살포 | 598 | 100 | 90.6 | 541 | 4.8 |
| | 화성C | 참드림 | 살포 | 598 | 101 | 92.0 | 551 | 5.6 |
| | 화성D | 참드림 | 살포 | 662 | 111 | 89.3 | 591 | 5.5 |
| 2025 | 평택 오성 A | 꿈마지 | 살포 | 759 | 113 | 89.2 | 676 | 5.7 |
| | 평택 오성 B | 꿈마지 | 미살포 | 673 | 100 | 88.9 | 597 | 5.7 |



표 16. 수량 및 백미 품질 삼원분산분석 결과

| 요인 | 쌀수량 | 완전립비율 | 완전미 수량 | 단백질 |
|----------|------|-------|--------|------|
| 퇴비 | * | n.s. | * | n.s. |
| 품종 | *** | n.s. | *** | * |
| 기상 | ** | n.s. | ** | n.s. |
| 퇴비×품종 | * | n.s. | (∇) | n.s. |
| 퇴비×기상 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| 품종×기상 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| 퇴비×품종×기상 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |

이러한 차이는 표 12에서와 같이 2025년의 고온·다우 재배환경에서 퇴비 살포가 토양 양분 공급과 생육 유지에 긍정적으로 작용하여 수량 증대뿐 아니라 등숙 안정성 확보에도 기여했을 가능성을 시사했다. 따라서 퇴비 시용 효과는 연차별 기상조건에 따라 달라질 수 있으며, 특히 고온·다우 조건에서는 생육 및 등숙 안정성 유지에 기여하여 최종적인 완전립 생산성 향상에 유리하게 작용할 수 있다. 퇴비 살포, 품종 및 기상을 요인으로 수량 및 백미 품질 지표를 삼원분산분석한 결과, 쌀수량과 완전미 수량에서는 퇴비 살포효과가 유의하게 나타났으나, 완전립비율과 단백질 함량에서는 유의하지 않았다. 또한 품종과 기상은 수량 및 일부 품질 지표에 더 큰 영향을 미쳤으며, 상호작용 효과는 대부분 유의하지 않았다(표 16.).

사. 도복 및 병해충 발생

우분퇴비 시용은 도복, 병해충 위험을 키우는 경향이 있다는 보고(양호성, 2017)가 있어 성숙기 도복 정도와 병해충 피해율을 조사한 결과는 표 17과 같다. 벼 성숙기 도복 및 병해충 발생은 연도와 품종에 따라 차이를 보였으나, 퇴비 살포 여부에 따른 일정한 경향은 나타나지 않았다. 2023년의 도복 정도는 1~3 수준으로 비교적 낮았고, 2024년에는 전반적으로 3~5 수준으로 가장 높았으며, 2025년에는 모두 1 수준으로 매우 낮았다. 잎집무늬마름병 피해율은 2023년 1~5%, 2024년 1%, 2025년 1~3% 범위였고, 흑명나방 피해율은 2023년 1~3%, 2024년 1%, 2025년 1~2% 범위로 두 병해충 모두 조사된 피해 수준이 허용최고수준보다 낮아 실질적인 피해는 크지 않았다. 벼 도복은 성숙기에 이삭중 증가와 함께 풍우 조건에 의해 악화될 수 있고, 병해충 역시 기상과 품종 반응의 영향을 크게 받는다는 보고(Kwon et al., 2012; Shah et al., 2019; Mullangie et al., 2024)가 있다. 2024년의 경우 10월 하순까지 고온이 지속되고 수확기 강우가 발생하여 도복정도는 증가하고, 병해충 피해율은 낮았던 것으로 판단되었다. 퇴비 살포, 품종, 기상을 요인으로 도복 및 병해충 발생을 삼원분산분석한 결과(표 18.), 퇴비 살포 여부는 도복, 잎집무늬마름병 및 흑명나방 발생에 유의한 영향을 나타내지 않았지만, 품종과 기상은 유의한 영향을 나타냈다. 또한 퇴비×품종, 퇴비×기상, 품종×기상 및 퇴비×품종×기상의 상호작용은 모두 유의하지 않았다.

표 17. 벼 성숙기 도복 및 병해충 발생

| 연도 | 조사 지역 | 품종 | 퇴비 살포 | 도복 ¹⁾ (1~9) | 병해충 피해있음(%) | |
|------|---------|-----|-------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| | | | | | 잎집무늬마름병 ²⁾ | 흑명나방 ³⁾ |
| 2023 | 용인A | 추청 | 살포 | 3 | 5 | 3 |
| | 용인B | 삼광 | 미살포 | 1 | 1 | 1 |
| | 화성C | 골드퀸 | 살포 | 3 | 3 | 3 |
| | 화성D | 골드퀸 | 살포 | 3 | 3 | 3 |
| | 화성E | 골드퀸 | 미살포 | 1 | 1 | 1 |
| 2024 | 평택A | 참드림 | 살포 | 5 | 1 | 1 |
| | 평택B | 참드림 | 미살포 | 3 | 1 | 1 |
| | 화성C | 참드림 | 살포 | 5 | 1 | 1 |
| | 화성D | 참드림 | 살포 | 5 | 1 | 1 |
| | 화성E | 참드림 | 미살포 | 5 | 1 | 1 |
| 2025 | 평택 오성 A | 꿈마지 | 살포 | 1 | 3 | 2 |
| | 평택 오성 B | 꿈마지 | 미살포 | 1 | 3 | 2 |
| | 평택 청북 A | 진옥 | 살포 | 1 | 1 | 1 |
| | 평택 청북 B | 진옥 | 미살포 | 1 | 1 | 1 |

¹⁾이삭줄기 경사 15%이하(1), 16~30%(3), 31~45%(5), 이삭이 지면에 닿음(7), 완전히 땅에 깔림(9)

²⁾병해 요방제수준: 20%

³⁾충해 요방제수준: 7%

※ 조사일: 2023.09.22 / 2024.09.30. / 2025.8.27.(진옥), 2025.9.29.(꿈마지)

표 18. 벼 성숙기 도복 및 병해충 발생 삼원분산분석 결과

| 요인 | 도복 | 잎집무늬마름병 | 흑명나방 |
|----------|------|---------|------|
| 퇴비 | n.s. | n.s. | n.s. |
| 품종 | * | ** | ** |
| 기상 | ** | ** | * |
| 퇴비×품종 | n.s. | n.s. | n.s. |
| 퇴비×기상 | n.s. | n.s. | n.s. |
| 품종×기상 | n.s. | n.s. | n.s. |
| 퇴비×품종×기상 | n.s. | n.s. | n.s. |

4. 적요

본 연구는 우분퇴비를 이용한 경축순환농업이 논 토양화학성과 벼 생육에 미치는 영향을 구명하고자 2023년부터 2025년까지 수행하였다.

- 가. 2023~2025년 경축순환농업 추진단지 신청면적은 2023년 949ha, 2024년 1,000ha, 2025년 1,763ha로 지속적으로 확대되었으며, 장비 진입 불가, 유기물 함량 초과, 제한구역(하천유역) 등의 사유로 실제 우분퇴비 살포면적은 2023년 894ha, 2024년 851ha, 2025년 1,078ha였다.
- 나. 경축순환농업 추진단지의 논 토양화학성은 대체로 적정범위를 유지하였으나, 유효인산(Av.P₂O₅)과 교환성 칼륨 함량이 높은 시·군도 있었다.
- 다. 2023~2025년 경축순환농업 추진단지의 평균 토양화학성은 pH 6.5, 유기물 21g kg⁻¹, 유효인산 126mg kg⁻¹, 유효규산 218mg kg⁻¹, 교환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘이 각각 0.48, 6.1, 1.6cmolc kg⁻¹ 이었다.
- 라. 2023~2025년 경축순환농업 조사지점의 가축분퇴비 살포유무에 따른 시험 전·후 토양화학성을 삼원분산분석한 결과, 조사 시기와 연도의 영향이 전반적으로 크게 나타났으며, 퇴비 살포 효과는 pH, 유효인산, 유효규산 및 교환성 칼륨 등 일부 항목에서 유의하였으나, 요인 간 상호작용 효과는 유의하지 않았다.
- 마. 가축분퇴비 살포 유무에 따른 벼 생육 특성을 삼원분산분석한 결과, 성숙기 생육, 수량구성요소, 도복 및 병해충 피해있를에 대한 퇴비 살포 효과가 유의하지 않았다. 반면 쌀수량과 완전미 수량에서는 퇴비 살포 효과가 유의하였으며, 전반적으로 품종과 기상 영향이 크게 나타났으나 요인 간 상호작용 효과는 유의하지 않았다.
- 바. 우분퇴비를 표준살포량 범위에서 시용한 경축순환농업은 관행농업과 비교할 때 일부 토양화학성 항목과 쌀수량, 완전미 수량에서는 차이가 나타났으나, 논 토양화학성과 벼 생육 및 품질에 전반적으로 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 우분퇴비 표준살포량을 준수한 경축순환농업은 논 토양과 벼 재배에 대체로 안정적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 인용문헌

- 경기도농업기술원. 2024. 축산·미생물 지도사업.
- 경기도농업기술원. 2025. 2024년도 시험연구보고서. 우분퇴비 시용량에 따른 벼 생육 및 미질특성 구명. 360-371.
- 농림축산식품부. 2013. 중장기 가축분뇨 자원화 대책.

- 농림축산식품부. 누리집. 2023년 축산환경조사.
- 농어업·농어촌특별위원회. 2019. 제3차 농어업·농어촌특별위원회 개최 결과.
- 농촌진흥청. 농사로. 가축분뇨배출원단위.
- 양호성. 2017. 친환경 비재배를 위한 가축분퇴비의 무기질비료 대체 효과. 전북대학교 석사학위논문.
- 한국농촌경제연구원. 2020. 경축순환농업 실태 분석과 활성화 방안.
- Das, S., Jeong, S. T., Das, S., and Kim, P. J. 2017. Composted cattle manure increases microbial activity and soil fertility more than composted swine manure in a submerged rice paddy. *Frontiers in Microbiology* 8:1702.
- Hao, X., and Chang, C. 2003. Does long-term heavy cattle manure application increase salinity of a clay loam soil in semi-arid southern Alberta? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 94(1):89-103.
- Kim, S. Y., Jeong, S. T., Ho, A., Hong, C. O., Lee, C. H., and Kim, P. J. 2018. Cattle manure composting: Shifts in the methanogenic community structure, chemical composition, and consequences on methane production potential in a rice paddy. *Applied Soil Ecology* 124:344-350.
- Ko, D. Y., Ahn, B. K., Moon, H. C., and Chon, H. G. 2021. Changes in paddy soil properties and rice yield as affected by application time of granular livestock manure compost. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 54(2):237-246.
- Kwon, Y.S., S.G. Lee, Y.G. Park, H.J. Choi, and Y.J. Ahn. 2012. Effects of meteorological factors and global warming on rice insect pests in Korea. *Entomological Research* 42(6):263-270.
- Lee, Y., Yun, H. B., Sung, J. K., Ha, S. K., Song, Y. S., Sonn, Y. K., and Lee, D. B. 2014. Effect of cattle-manure application on soil chemical properties and crop yields in rice-forage cropping system. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 47(6):553-557.
- Lee, Y. H., Park, S. J., Shim, J. H., Kwon, S. I., and Kim, S. H. 2021. Effect of livestock manure composts application on yield, soil chemical properties and carbon sequestration of maize cropping for five years. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 54(4):636-642.
- Liu, M., Y. Zhou, J. Sun, F. Mao, Q. Yao, B. Li, Y. Wang, Y. Gao, X. Dong, S. Liao, P. Wang, and S. Huang. 2023. From the floret to the canopy: High temperature tolerance during flowering. *Plant Communications* 4(6):100629.
- Satake, T., and S. Yoshida. 1978. High temperature-induced sterility in indica rices at flowering. *Japanese Journal of Crop Science* 47:6-17.
- Shah, L., A. Yahya, S.S. Shah, R. Nadeem, M. Ali, A. Ali, Y. Wang, R. Rauf, and F.



Wu. 2019. Improving lodging resistance: Using wheat and rice as classical examples. International Journal of Molecular Sciences 20(17):4211.
 Mullangie, D.P., K. Thiyagarajan, M. Swaminathan, J. Ramalingam, S. Natarajan, and S. Govindan. 2024. Breeding resilience: Exploring lodging resistance mechanisms in rice. Rice Science 31(6):659-672.

6. 연구결과 활용제목

- 경축순환에 따른 논 토양화학성 및 미질 특성(영농활용, 2025년)
- 경축순환농업 확대보급 시 논 토양화학성 및 미질 정보활용(정책건의, 2025년)

7. 연구원 편성

| 세부과제 | 구분 | 소속 | 직급 | 성명 | 수행업무 | 참여년도 | | |
|--|-------|-------------|-------|-----|----------|------|----|----|
| | | | | | | 23 | 24 | 25 |
| 경축순환농업 추진단지 토양 및 벼 생육특성 구명 | 책임자 | 환경농업 연구과 | 농업연구사 | 서재순 | 세부과제총괄 | - | - | ○ |
| | 공동연구자 | 〃 | 농업연구사 | 정재원 | 토양화학성 조사 | ○ | ○ | ○ |
| | 〃 | 〃 | 〃 | 안희정 | 벼 생육 조사 | ○ | ○ | ○ |
| | 〃 | 〃 | 〃 | 장재은 | 자료 정리 | - | - | ○ |
| | 〃 | 〃 | 〃 | 이정혜 | 자료 정리 | ○ | ○ | - |
| | 〃 | 〃 | 〃 | 주옥정 | 기상데이터 조사 | ○ | ○ | - |
| | 〃 | 〃 | 농업연구관 | 소호섭 | 성적 검토 | ○ | ○ | ○ |
| | 〃 | 〃 | 〃 | 박중수 | 결과 활용 검토 | ○ | ○ | ○ |