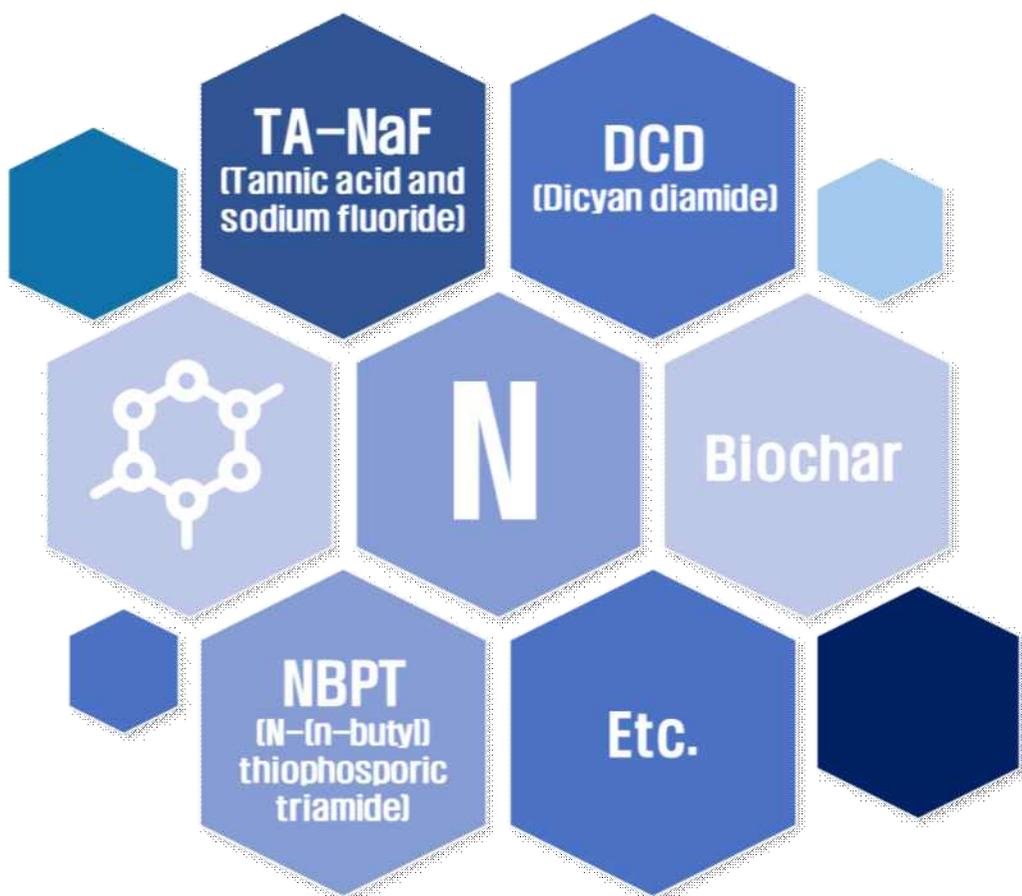


한우 퇴비 사용 시 경작지에서 암모니아 배출원 규명 및 저감법 연구



2024. 01.

「본 연구 결과는 연구진의 의견 및 주장이며 한우자조금의 공식
입장과는 다를 수 있음」

최종 보고서



한우 퇴비 사용 시 경작지에서 암모니아
배출원 규명 및 저감법 연구

2024년 1월

강원대학교 산학협력단

제 출 문

한우자조금관리위원장 귀하

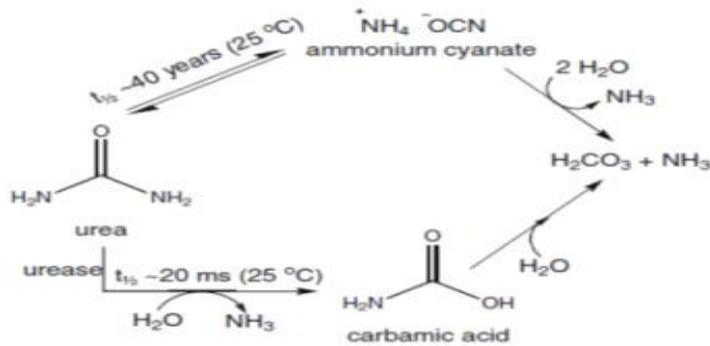
본 보고서를 「한우 퇴비 사용 시 경작지에서 암모니아 배출원 규명 및 저감법 연구」의 완료보고서로 제출합니다.

2024년 01월
강원대학교 박 규 현

연구 기관명 | 강원대학교 산학협력단
연구 책임자 | 박규현 (강원대학교, 부교수)
연구 교수 | 이종식 (강원대학교, 연구교수)
모하메드 아탈라히 (강원대학교, 연구교수)
연구 보조원 | 박근우 (강원대학교, 박사과정)
김동우 (강원대학교, 박사과정)
에스카 누그라하에닌띠야스 (강원대학교, 박사과정)
보 조 원 | 데가니 마흘라 (강원대학교, 석사과정)

요 약

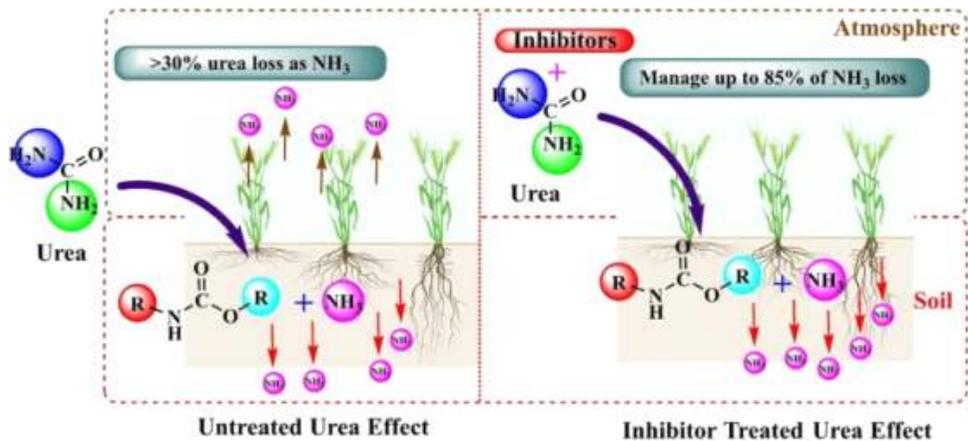
- 가축분뇨는 처리되어야 할 폐기물인 동시에 활용 가능한 자원이나 가축에서 배출되는 암모니아(NH_3)는 아산화질소(N_2O)의 간접 배출원이고 2차 미세먼지 (particulate matter; PM) 생성의 전구체로서 전체적인 미세먼지 부하에 기여함 (Koolen et al., 2019)
- 이번 연구를 통하여 경작지에서 발생하는 암모니아 가스의 배출 원인이 가축분뇨 때문인지 혹은 화학비료 중 요소비료 때문인지를 명확하게 밝히고, 암모니아의 가스 배출량을 줄이기 위한 방법으로 요소분해효소 억제제의 효과 여부를 확인하고자 함



<요소분해 기작>

- 요소의 분해과정을 통해 두 개 분자의 암모니아(NH_3)와 한 분자의 카르보닉산(H_2CO_3)이 생성되므로 이 과정을 요소분해효소(NBPT) 저해제를 첨가하여 암모니아 생성 저감 효과를 평가
- 본 실험의 경우 현장에서 농작물 생육을 위해 표준시비량보다 과비하는 경우를 고려하여 청예옥수수 20kgN의 질소 사용량을 2배 늘려 40kgN 기준으로 요소비료 및 한우 퇴비를 사용하였으며, 요소비료와 퇴비를 혼합하여 처리하는 경우에는 각각 절반의 양을 사용함
- 요소 비료의 단일 사용은 퇴비 단일 사용에 비해서 암모니아 가스 발생량의 유의적 차이가 있었으며, 무려 18배 정도 더 많은 양의 암모니아 가스가 발생하였음

- 퇴비만 시비를 한 경우, 퇴비+요소 복합 시비보다 암모니아 발생량이 적어 퇴비(한우분)로 인한 냄새 발생 피해가 심각하다는 것에 반증하는 연구 결과를 도출할 수 있었으며, 지나치게 많은 양의 요소비료 또는 퇴비+요소 복합 시비가 악취 민원의 원인이 될 수 있음을 확인할 수 있었음
- 농가에서는 퇴비 또는 퇴비+요소 복합 시비의 경우 요소분해효소 억제제 (NBPT)를 활용하여 22% 수준 이하로 암모니아의 발생량을 감소시킬 수 있을 것으로 평가됨
- 요소와 퇴비를 함께 시비할 경우, 요소분해효소 억제제를 처리하면 초기 토양 내 암모니아의 발생을 억제하여 장기간에 걸쳐 질소원을 토양에 저장 및 공급함으로 추가적인 요소 비료의 사용을 저감할 수 있어 경제적, 환경적 이점을 가질 수 있음



(source: Asim et al., 2021)

- 바이오차의 경우 초기에는 저감효과가 있는 것처럼 보였으나, 실험 종료일에는 퇴비+요소 처리구보다 오히려 암모니아 발생량이 2.60 배 더 많이 발생하는 것으로 보아 요소분해효소 억제제로 적합하지 않다는 것으로 평가됨
- 향후 퇴비, 요소 비료에 요소분해효소 억제제를 처리하였을 때 작물의 성장과 수확량에 대한 추가적인 연구와 그 작물을 사람이나 동물이 먹었을 경우 유해하지 않은지에 대한 연구가 필요함

〈 연구 목차 〉

제1장. 연구배경 및 필요성	01
제1절. 연구 현황 및 문제점	01
1. 암모니아의 배출 현황 및 문제점	01
2. 요소와 요소분해효소의 역할과 암모니아 발생 과정	08
3. 질소성 물질 휘발 저감 방안을 위한 방안	16
제2절. 본 연구의 차별점	23
제3절. 연구 필요성	24
제4절. 연구 목적 및 방법	25
1. 연구목적(목표)	25
2. 연구내용 및 방법	26
제2장. 한우 퇴비 사용 시 경작지에서 암모니아 배출원 규명 및 저감법 연구	25
제1절. 퇴비와 요소분해효소의 암모니아 발생 영향 규명	25
1. 퇴비와 요소비료의 암모니아 발생정도 파일럿 테스트	26
2. 연구결과	32
제2절. 바이오차 처리에 따른 암모니아 발생 저감 효과 규명	44
1. 경작지에서의 비료 처리 종류에 따른 암모니아 발생 평가 연구	45
2. 연구결과	49
제3절. 종합결론	84
제3장. 요약 및 결론	86

참고문헌.....	90
부록.....	95

< 표 목차 >

표 1-1. 가축 퇴비 및 토양 내 요소 함량.....	04
표 1-2. 작물별 시비처방 기준(2022).....	20
표 2-1. 처리별 초기 (처리후 1일 이내) 암모니아 발생 저감제 효과 평가.....	37
표 2-2. 1차 실험 각 처리구별 암모니아 농도의 유의성 분석.....	38
표 2-3. 시험 전 토양화학성.....	39
표 2-4. 요소분해효소억제제 처리에 따른 시험 후 토양화학성.....	40
표 2-5. 시험 후 토양화학성 분석 결과.....	41
표 2-6. 농경지 실험 처리구별 암모니아 농도 (ppb).....	49
표 2-7. 각 처리구별 암모니아 농도의 유의성 분석.....	83

〈 그림 목차 〉

그림 1-1. 도시지역 PM _{2.5} 에 미치는 농업의 영향.....	01
그림 1-2. 지구의 생태계 복원의 7 가지 과정.....	02
그림 1-3. 농·축산업에서의 암모니아 (NH ₃) 발생.....	03
그림 1-4. 암모니아 발생 경로.....	05
그림 1-5. 초미세먼지 (PM _{2.5})의 성분과 위험성.....	06
그림 1-6. 분뇨중 암모니아의 휘산율.....	07
그림 1-7. 표준 우사 바닥 (Standard slatted floors).....	08
그림 1-8. 수분함량에 따른 퇴비화 과정 중의 암모니아 발생량...	10
그림 1-9. 부숙 퇴비와 퇴적단식 퇴비의 암모니아 발생량.....	10
그림 1-10. 수분함량에 따른 퇴비화 과정 중의 암모니아 발생량..	11
그림 1-11. 토양 내 암모니아 (NH ₃) 발생.....	12
그림 1-12. pH에 따른 암모늄(NH ₄ ⁺)과 암모니아(NH ₃)의 비율.....	13
그림 1-13. 국가 암모니아 (NH ₃)의 발생 분류체계 (a) 과거 (b) 현재...	14
그림 1-14. 미세먼지의 발생과정 흐름도.....	15
그림 1-15. 질소성 물질 휘발 저감 방안.....	16
그림 1-16. 탄닌산과 불소나트륨(TA-NaF)의 작용 과정.....	17
그림 1-17. 토양 내 질산화 과정.....	18
그림 1-18. 암모니아 (NH ₃) 발생 저감 방안의 문제점.....	22
그림 1-19. 연구의 필요성.....	24
그림 1-20. 요소, 우레아제 및 분뇨의 암모니아 발생량.....	25
그림 2-1. 레이저 자동측정기 측정 방법.....	29
그림 2-2. 암모니아 분석 장비 및 실험 셋팅 사진.....	31
그림 2-3. 토양수분 상태에 따른 요소분해효소 억제제 처리 효과	32

그림 2-4. 처리별 암모니아 발생량 평가.....	33
그림 2-5. 질소 시용 형태별 암모니아 발생 (20 kg N/10a 처리)...	34
그림 2-6. 퇴비+요소 혼용 처리구 질소 시용별 암모니아 발생에 미치는 요소분해효소 억제제 처리 효과.....	35
그림 2-7. 퇴비+요소 혼용처리구의 요소분해효소 억제제 처리 형태 별 암모니아 발생.....	36
그림 2-8. 질소 시용 형태별 바이오차 처리에 따른 암모니아 발생...	36
그림 2-9. 처리별 토양 C/N 비.....	40
그림 2-10. 요소분해억제제(NBPT) 처리별 토양 C/N비.....	41
그림 2-11. 바이오차 처리별 토양 C/N비.....	42
그림 2-12. 퇴비 처리구 경감제 종류별 토양 C/N비.....	43
그림 2-13. 요소 처리구 경감제 종류별 토양 C/N비.....	43
그림 2-14. 레이저 자동측정기 측정 방법.....	45
그림 2-15. 실험에 사용된 Closed 챔버법 및 발생량 계산법.....	46
그림 2-16. 외부 경작지 하우스 설치.....	47
그림 2-17. 각 처리구에 따른 외부 실험 준비 사진.....	48
그림 2-18. 처리구별 암모니아 농도 평균.....	51
그림 2-19. 대조구(흙)의 암모니아 농도 변화.....	52
그림 2-20. 요소 처리구의 암모니아 농도 변화.....	54
그림 2-21. 퇴비 처리구의 암모니아 농도 변화.....	55
그림 2-22. 퇴비+요소 처리구의 암모니아 농도 변화.....	57
그림 2-23. 처리구별 암모니아 농도 변화.....	59
그림 2-24. 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구의 암모니아 농도 변화.....	61
그림 2-25. 퇴비+요소+바이오차 처리구의 암모니아 농도 변화.....	63

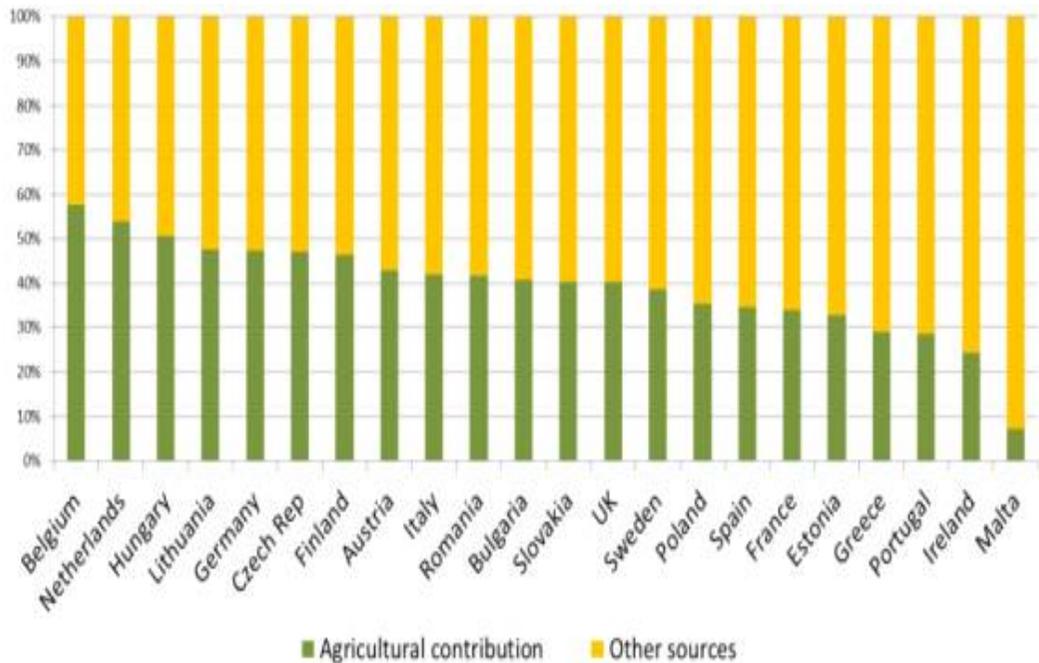
그림 2-26. 요소분해효소 억제제 처리구별 암모니아 농도 변화 비교.....	64
그림 2-27. 일자별 대조구(흙) 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림.....	66
그림 2-28. 일자별 요소 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림.....	67
그림 2-29. 일자별 퇴비 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림.....	68
그림 2-30. 일자별 퇴비+요소 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림.....	69
그림 2-31. 일자별 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림.....	70
그림 2-32. 일자별 퇴비+요소+바이오차 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림.....	71
그림 2-33. 처리구별의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림.....	73
그림 2-34. 요소분해효소 억제제 처리구별 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림.....	75
그림 2-35. 대조구(흙) 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화.....	76
그림 2-36. 요소 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화.....	77
그림 2-37. 퇴비 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화.....	78
그림 2-38. 퇴비+요소 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화.....	79
그림 2-39. 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화.....	80
그림 2-40. 퇴비+요소+바이오차 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화.....	81
그림 2-41. 처리구별 암모니아 농도 상자 수염 그림.....	82

제1장. 연구 배경 및 필요성

제1절. 연구 현황 및 문제점

1. 암모니아의 배출 현황 및 문제점

- 가축분뇨는 처리되어야 할 폐기물인 동시에 활용 가능한 자원이나 가축에서 배출되는 암모니아(NH_3)는 아산화질소(N_2O)의 간접 배출원이고 2차 미세먼지 (particulate matter; PM) 생성의 전구체로서 전체적인 미세먼지 부하에 기여함 (Koolen et al., 2019)
- 전지구적으로 아산화질소 배출량의 60% 이상이 농업부문에서 배출되고 있음



(Koolen et al., 2019)

그림 1-1. 도시지역 $\text{PM}_{2.5}$ 에 미치는 농업의 영향

- 지구 생태계 복원(Bio-regeneration of earth)을 위한 7개 process 중 첫 단계로 농업분야에서의 아산화질소 저감을 제시하고 있음(Sandy Hinden, 2022)



(Sandy Hinden, 2022)

그림 1-2. 지구 생태계 복원의 7가지 과정

- 농업은 암모니아 배출원의 하나로 배출된 암모니아는 환경에 영향을 미치며, 대기 중에서 암모니아(NH₃)는 아황산가스(SO₂) 및 질소산화물(NO, NO₂)과 같은 다른 가스와 결합하여 미세먼지를 형성함

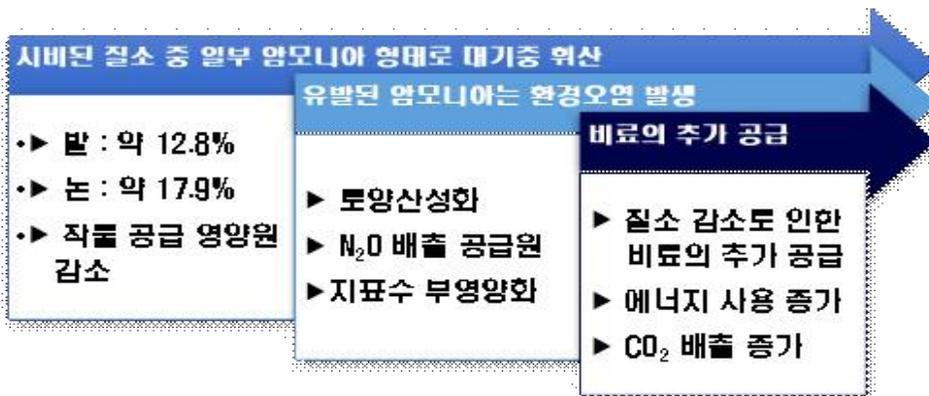


그림 1-3. 농·축산업에서의 암모니아 (NH₃) 발생

- 분뇨에 존재하는 요소태 질소는 미생물 요소분해효소 활성화에 의해 암모니아 및 이산화탄소(CO₂)로 가수분해 되며 배설 후 1~2일 이내에 암모니아가 빠르게 발생함 (Spek et al., 2013)

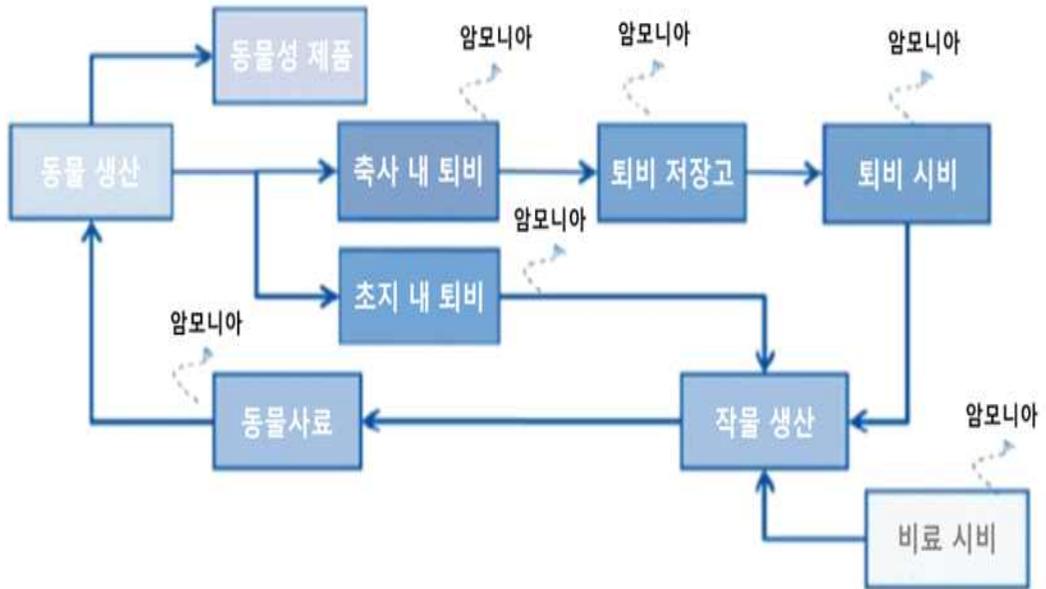
- 소로부터 배출되는 질소의 50% 이상이 암모니아로 손실될 수 있으며, 배출된 암모니아의 상당 양이 직경 2.5 μm 이하의 초미세먼지(PM_{2.5}) 형성에 영향을 줌 (Hristov, 2011)

- 유럽에서의 암모니아 발생은 90% 이상이 농업 분야에서 발생하며 이중 80%는 가축분뇨, 20%는 비료에서 기인함 (Susana et al., 2013)

- 가축 퇴비 및 토양 내 요소 함량 문헌 조사 자료

표 1-1. 가축 퇴비 및 토양 내 요소 함량

배출원	요소 / 요소분해효소	종류	양	참고자료
분뇨	요소	돼지 분	81.3mmol/kg	Hao et al, 2019
		돼지 뇨	421.7mM	Hao et al, 2019
		돼지 뇨	99.2mmol/L	Dal et al, 2014
		소(가축) 뇨	76.4mmol/L	Dal et al, 2014
		젖소 뇨	185~212gN/day	Spek et al, 2013
		돼지 뇨	0.321g/day	Mansilla et al, 2017
	요소분해효소	돼지 분 (Vmax)	7,423.14 μ g 요소 분해력/g/시간	Dal et al, 2014
		소 분(Vmax)	2,882.88 μ g 요소 분해력/g/시간	Dal et al, 2014
		돼지 퇴비	3,841 μ g/g	Choi et al, 2007
흙	요소분해효소	농업 토양	527 μ g 요소 분해력/g/흡/시간	Chakrabarti et al, 2004
		염분이 높고 비옥하지 못한 토양	174 μ g 요소 분해력/g/흡/시간	Zhang et al, 2014
		흙	196 μ g/g	Choi et al, 2007



(source: Oenema and Velthof, 2012)

그림 1-4. 암모니아 발생 경로

- 가축분뇨에서 배출되는 암모니아 (NH₃)는 악취 뿐만 아니라 질소 성분 손실로 인한 비료 비용 증가, 환경 및 인체의 건강에도 영향을 줌 (Univ. of Massachusetts Amherst)
 - 암모니아는 온실가스 및 미세먼지의 전구체로 건강 및 환경에 영향
- 가축 및 축산 농가의 건강을 위해서는 축사 내의 암모니아 농도가 25 ppm 이하이어야 함 (Univ. of Massachusetts Amherst)
 - 암모니아에 의해 형성된 PM_{2.5}는 인간과 동물의 호흡기에 더 깊이 침투하여 조직을 손상시킬 수 있음(Naseem et al., 2018)

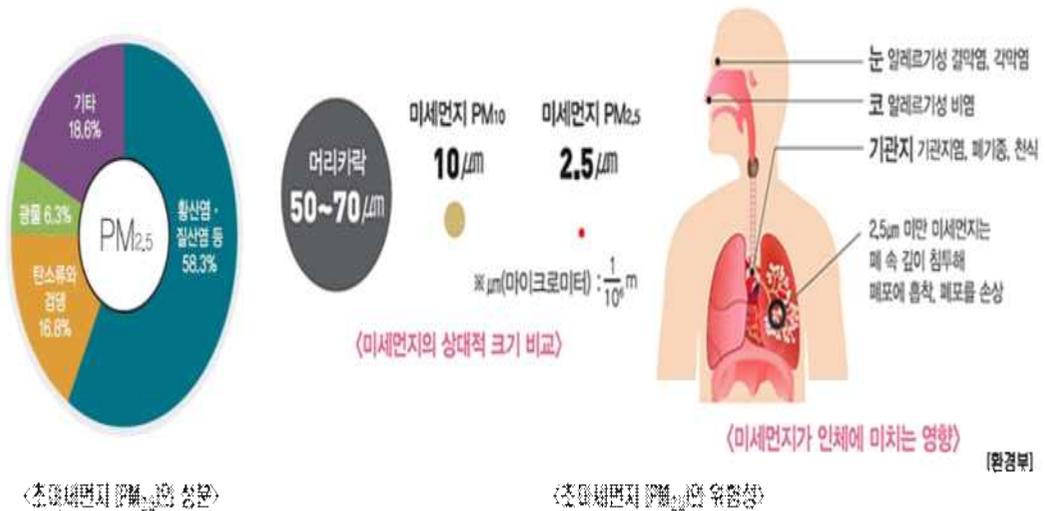
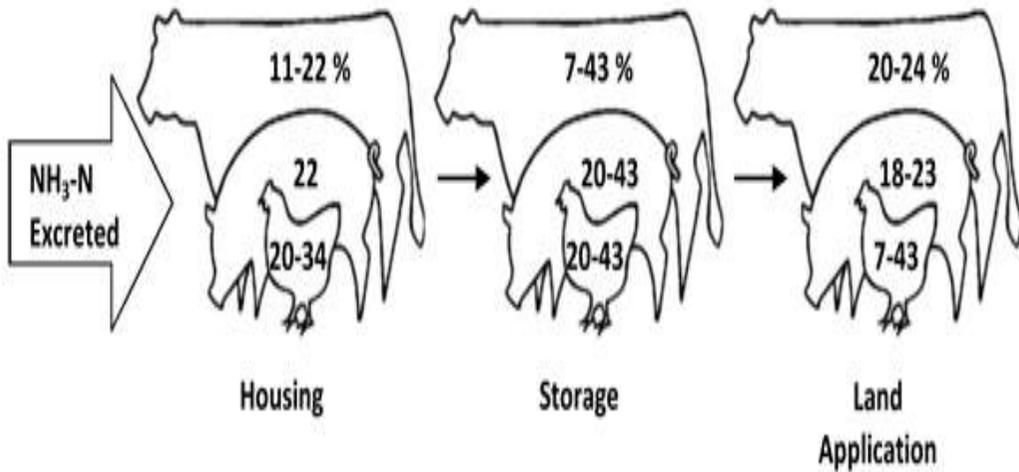


그림 1-5. 초미세먼지 (PM_{2.5})의 성분과 위험성

- 암모니아 배출량 감소가 PM_{2.5} 완화를 위한 효과적인 전략으로 암모니아 배출량이 50% 감소하면 지표면 근처의 연간 평균 PM_{2.5} 농도를 2~11% 감소시킬 수 있음 (Tsimpidi et al., 2007; Pozzer et al., 2017)
- 축산부문 탄소 배출량은 2020년 기준 인간 활동으로 인한 전지구적 온실가스 배출량의 5.6%를 차지하고 있음(UNFCCC, 2022)
 - 가축분뇨 관리로 인한 온실가스 배출량은 축산부문 온실가스 총 배출량의 25.4%를 차지하고 있으며, 이 중 34%가 아산화질소 형태임(UNFCCC, 2022)
- 영국의 ‘Net Zero & Livestock’ 보고서에 따르면 영국 축산농가에 매우 효과적인 완화 조치를 적용할 경우 온실가스 및 암모니아 배출량을 각각 23% 및 15% 줄일 수 있다고 보고함 (UK Agri-Tech Centres. 2022)
- 축종, 가축의 사양 및 분뇨관리 방법에 따라 암모니아 손실량의 차이가 큼 (Univ. of Massachusetts Amherst)



(source: EPA National Emissions Estimates, 2005)

그림 1-6. 분뇨중 암모니아의 휘산율

- 우사 바닥에는뇨와 분이 같이 있으므로, 요소분해효소가 활성화되어 암모니아가 발생하며, 이를 저감할 수 있는 방안이 필요함
 - 뇨와 분에서 요소분해효소 활성화를 방지하는 가장 효과적인 방법은 뇨와 분을 분리하는 것으로 축산업에서 가장 일반적인 관행은 바닥 구조를 변경하는 것임
 - 예를 들어 네덜란드에서는 slatted floor가 제일 많이 이용하는 시스템이며, 이 시스템은 효과적인 배수를 가능하게 하는 중력에 의존하여 일반 scrap과 결합하면 암모니아 배출이 40-60% 감소시킴



(source: Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB),2024
그림 1-7. 표준 우사 바닥 (Standard slatted floors)

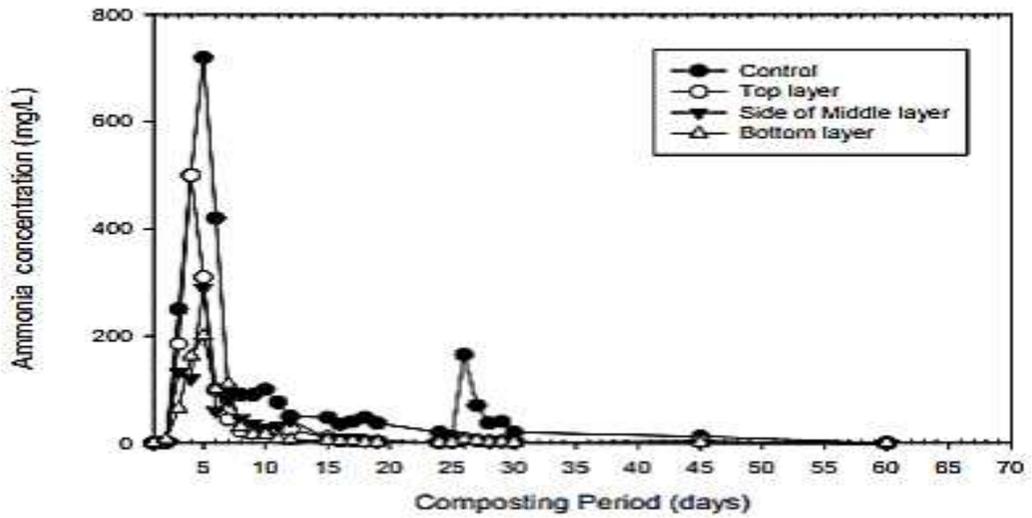
2. 요소와 요소분해효소의 역할과 암모니아 발생 과정

■ 요소분해효소의 활동 조건

- 요소분해효소 활성화를 위한 최적의 조건에는 pH와 온도가 필수적이며, 요소분해효소는 pH 7~8과 온도 40~50° C에서 최적의 활성을 갖음
- 유기물 함량이 높은 토양에는 요소분해효소의 활성과 양의 상관관계가 있음
- 우리나라는 기후와 식생이 상당히 균일하지만 토양 분포는 상당히 복잡하여, 토양의 요소분해효소 활성도는 낮을 것으로 예상됨
 - 여름의 평균 토양 온도는 20 ~ 25 °C, 겨울은 -5 ~ 5 °C이며, 논 토양의 pH는 지역에 따라 달라지나 일반적인 토양의 pH는 6~7 정도로 나타남

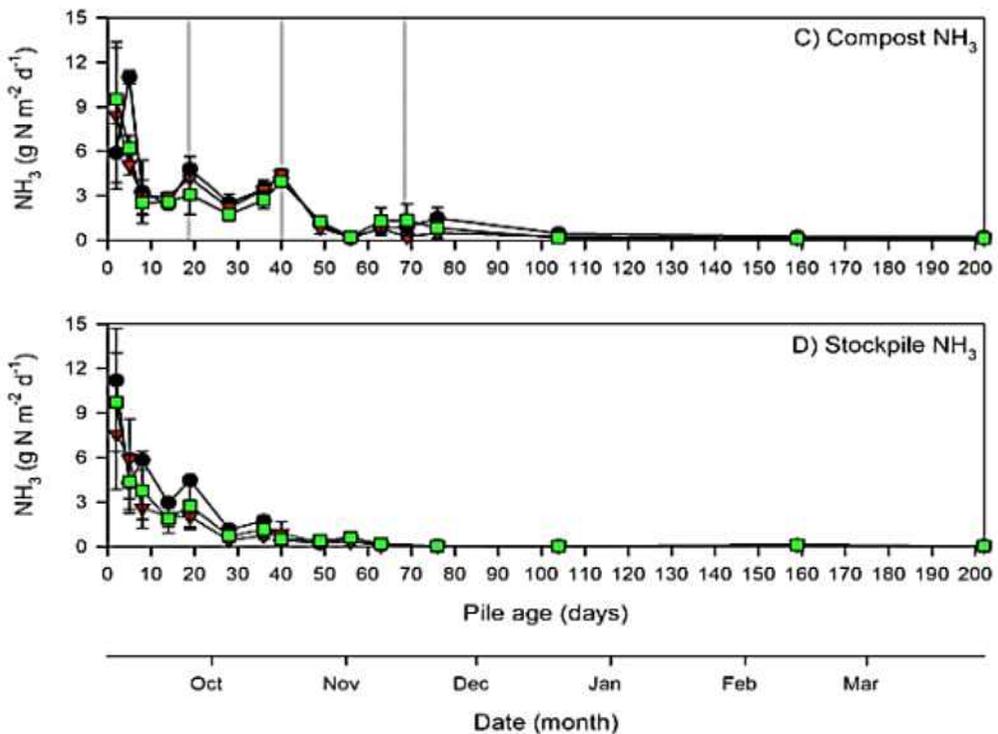
- 퇴비 및 비료, 토양 내에 있는 요소분해효소의 양 (amount of urease)
 - 요소분해효소는 일반적으로 무게 기준 요소분해효소의 양보다는 요소분해효소 활성으로 기술되며, 요소분해효소 활성은 토양 유형에 따라 달라짐
 - 일반적으로 토양의 요소분해효소 활성도는 퇴비의 요소분해효소 활성도보다 낮으나 농업 현장에서 퇴비+요소 비료 혼합물을 사용하는 경우 암모니아 배출량이 높은 경향이 있음
 - 요소 비료가 질소 공급원으로 작용하여 시간이 지남에 따라 축적된 암모니아 배출량이 높아짐
 - 퇴비를 단독으로 사용하면 일반적으로 퇴비의 질소 (0.5~5%)가 요소 비료(46%)보다 낮기 때문에 암모니아 발생량이 퇴비와 요소 비료를 혼합하여 사용하는 것보다 낮을 수 있음
 - 요소 비료를 단독 시비할 경우, 요소 비료의 시비량이 증가할수록 암모니아 배출이 증가하는 경향이 나타나 요소비료가 암모니아 배출과 밀접한 관련이 있음

- 퇴비는 퇴비화 과정 중 퇴비 내에 있던 요소와 요소분해효소가 작용하여 암모니아를 생성하며, 시간에 지남에 따라 퇴비 내에 있던 요소가 암모니아로 소모되어 결과적으로 암모니아 발생량이 감소함



(국립축산과학원, 2018)

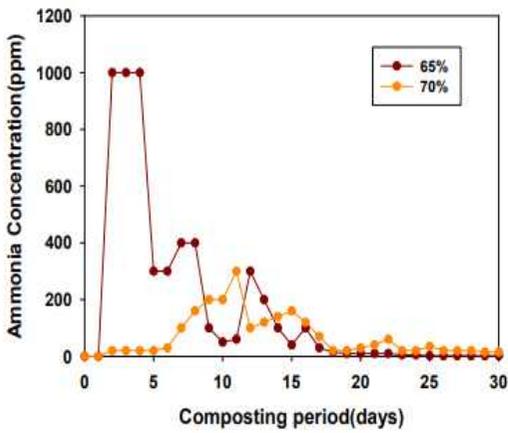
그림 1-8. 수분함량에 따른 퇴비화 과정 중의 암모니아 발생량



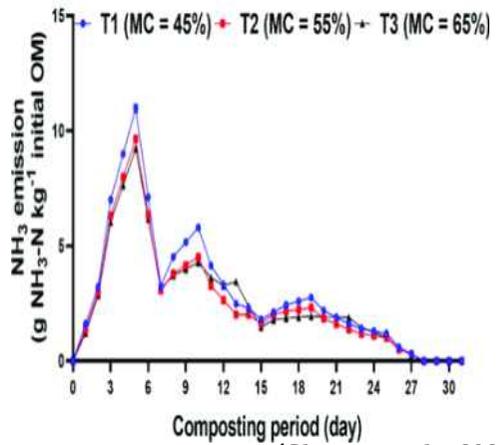
(NOP : 3-nitrooxypropanol, Mon : monensin)

(Owens et al., 2020)

그림 1-9. 부숙 퇴비와 퇴적단식 퇴비의 암모니아 발생량



(국립축산과학원, 2018)

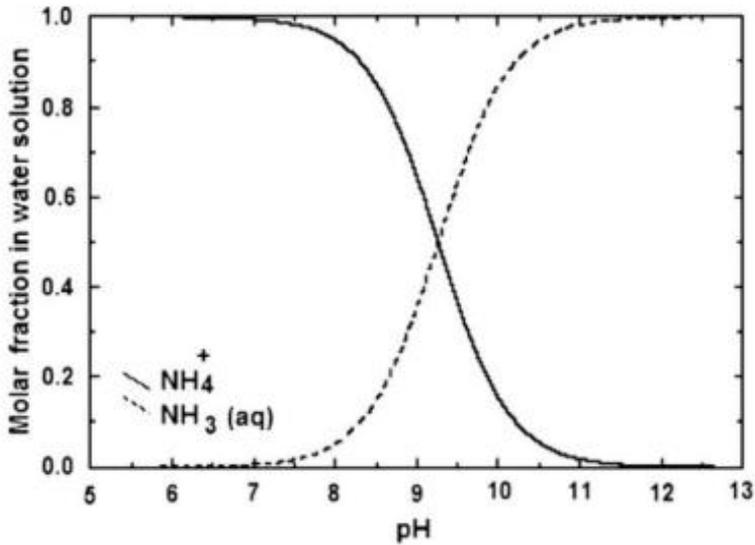


(Ghanneyetal., 2021)

그림 1-10. 수분함량에 따른 퇴비화 과정 중의 암모니아 발생량

- 농업 작물별 선호하는 질소비료에 대한 조사
 - 작물별 선호하는 암모니아태 질소/질산태 질소를 조사하여 퇴비 사용시 흡수율, 이용 효율 등에 대한 조사

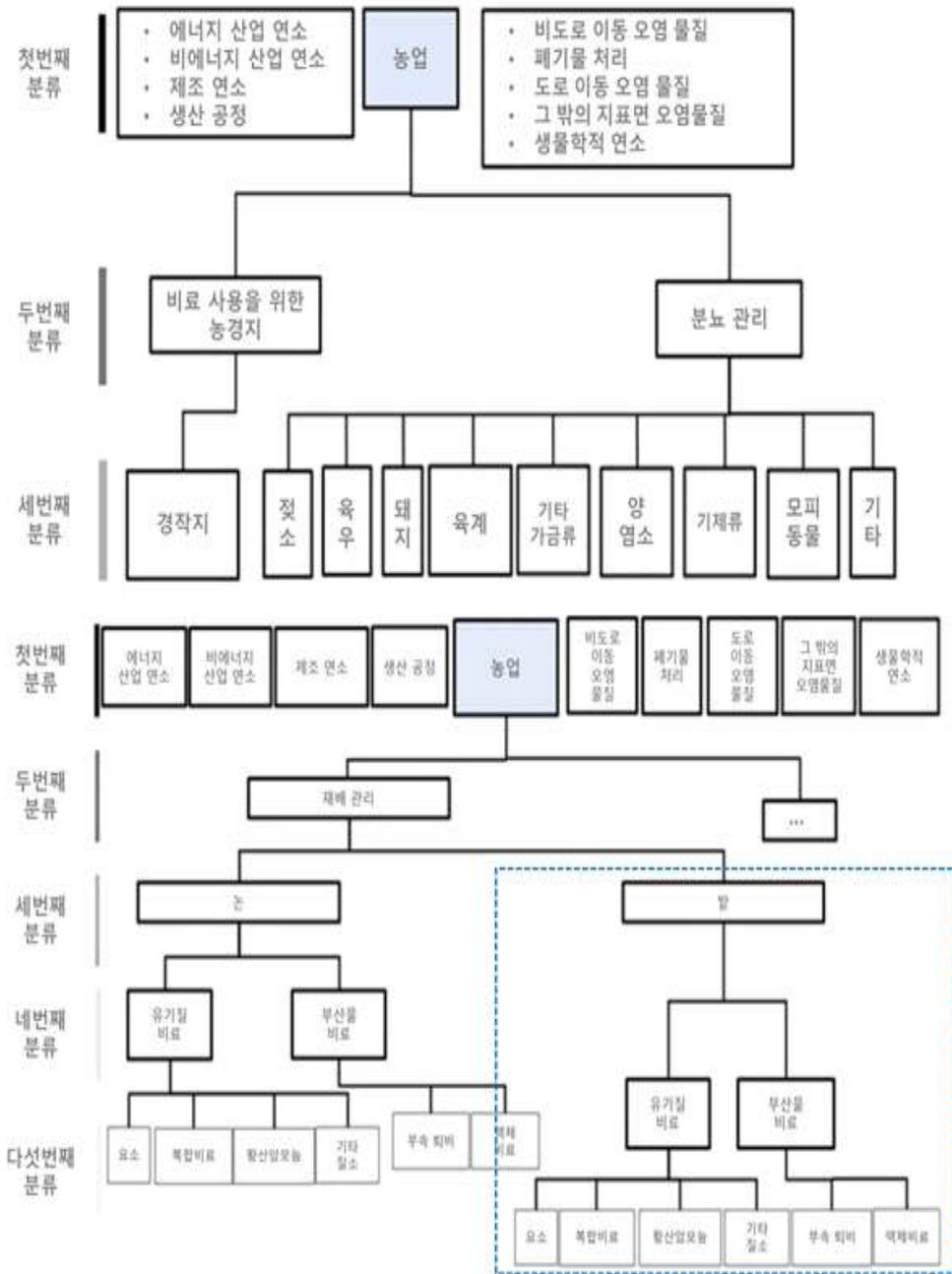
- 요소와 요소분해효소가 함께 존재하는 경우 요소분해효소는 요소를 암모늄(NH_4^+) 가용성 형태로 가수분해하며, 낮은 pH(8 미만)에서는 암모늄(NH_4^+)이 용해성 형태로 유지되어 식물이 질소 공급원으로 활용할 수 있으나, pH가 8보다 높으면 암모늄은 암모니아(기체 상태)로 바뀌고 공기 중으로 배출됨



(Prajapati, S., 2014)

그림 1-12. pH에 따른 암모늄 이온과 암모니아의 비율

- 농업에서 암모니아의 공기 중으로 배출은 비료 시비 동안 토양의 질소 함량이 식물에 의해 사용될 수 없기 때문에 질소 손실로 간주되며, 암모니아 형태로 손실된 질소를 보충하기 위해 더 많은 양의 비료를 사용하는 경우가 많아 결과적으로 화학비료의 과잉 사용으로 인한 토양 상태 악화를 유발함



(International Plant Nutrition Institute (IPND), 2016)
 그림 1-13. 국가 암모니아 (NH₃)의 발생 분류체계
 (a) 과거 (b) 현재

■ 암모니아의 미세먼지로서 작용 기작

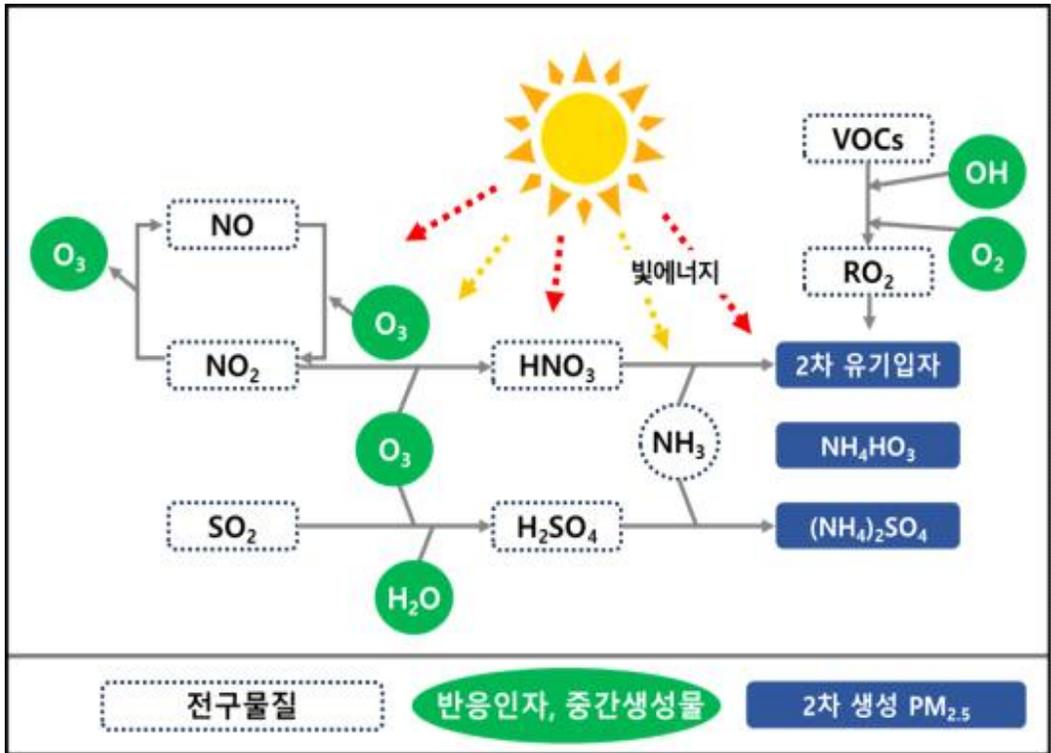


그림 1-14. 미세먼지의 발생과정 흐름도

- 화석연료의 연소과정 및 가축분뇨와 화학비료, 그리고 사람이 활동하면서 발생하는 각종 황산화물, 질소산화물이 암모니아 (NH₃) 가스와 만나서 에어로졸과 고체 에어로졸을 형성함 (USDA. 2007)
- 가축분뇨와 화학비료에서 둘 사이에서 어떠한 원인이 더 많은 양의 암모니아 가스를 발생하는지에 대한 연구와 규명은 미흡함
- 이번 연구를 통하여 경작지에서 발생하는 암모니아 가스의 배출 원인이 가축분뇨 때문인지 혹은 화학비료 중 요소비료 때문인지를 명확하게 밝히고, 암모니아의 가스 배출량을 줄이기 위한 방법으로 요소분해효소 억제제의 효과가 어떠한지 확인하고자 함

3. 질소성 물질 휘발 저감 방안을 위한 방안

- 질소성 물질 휘발 저감방안에 대한 선행연구에 대한 조사가 필요함

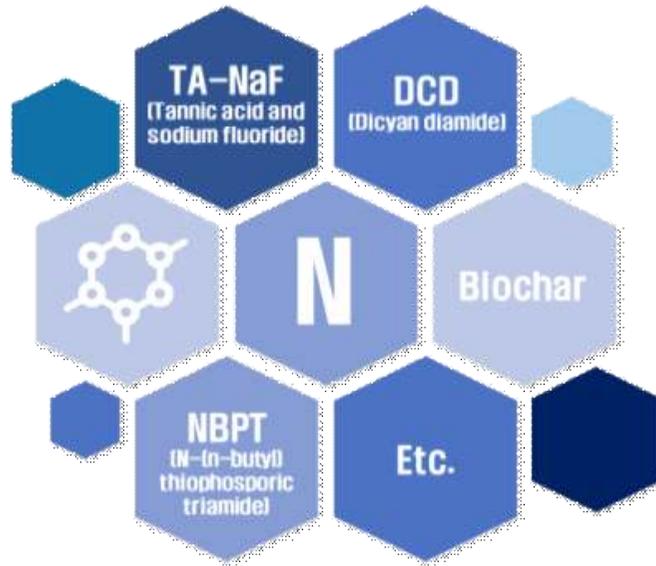
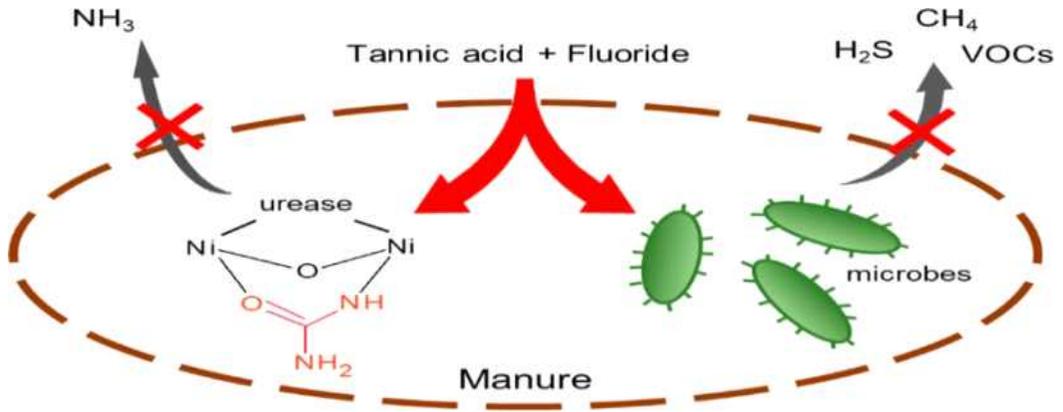


그림 1-15. 질소성 물질 휘발 저감 방안

- 돼지 분뇨에 탄닌산과 불화염 (tannic acid and sodium fluoride (TA-NaF))가 혼합된 미생물 저해제 처리로 악취물질 및 메탄 발생 저감 효과가 있음 (Frederik et al. 2020)
- 요소분해 및 질산화 억제제 처리에 따른 가스 배출저감 효과가 주로 작물 생육과정에서 수행 되었으며, 축산분뇨 처리에 따른 효과 규명은 미흡함
- 요소분해효소 억제제(DCD) 처리로 농경지 토양에서의 질산화가 억제되고 질소질비료 이용 효율이 증가함 (Guo et al., 2019)



(Dalby et al., 2020)

그림 1-16. 탄닌산과 불화염 (TA-NaF)의 작용 과정

- 요소분해효소 억제제 한 종류인 DCD는 AMO 효소 활성 부위를 차지하기 위한 암모니아와의 경쟁적 억제제로서 활성 부위를 차단함으로써 암모늄이 질산염으로 전환되는 속도를 낮춤
 - 요소비료 사용에 비해 DCD+요소 사용이 22.6% 감축하였음 (Akiyama et al., 2000)
 - 사양토에 DCD 사용으로 아산화질소 배출이 요소비료 대비 60~71% 감소하였음 (Majumdar, 2002)
 - 재배시 DCD 사용으로 메탄 및 아산화질소 발생량이 각각 53%와 47%가 저감됨(Xu et al., 2002)
 - DCD 처리로 논에서의 질산화율과 질산화물에 대한 아산화질소 비율이 감소됨 (Ting et al., 2013)
- DCD 처리는 아산화질소 저감을 위한 비용효과적인 방안의 하나로 될 수 있음 (Minet et al., 2015)
- 토양 살포 전 슬러리 저장고에 DCD를 처리함으로써 47%의 아산화질소 저감 효과를 나타냄(Cahalan et al., 2014)

- 요소분해효소억제제는 토양에 존재하는 요소분해 효소가 요소를 암모니아로 변환하여 휘발 시키는 과정을 억제하는 요소분해효소 억제제로 활용됨 (Pan et al., 2016)
- 암모니아 휘산 및 아산화질소 배출에 미치는 생물학적 질산화 억제(BNI; biological nitrification inhibition)에 대한 정보가 부족함 (Priscila et al., 2020)

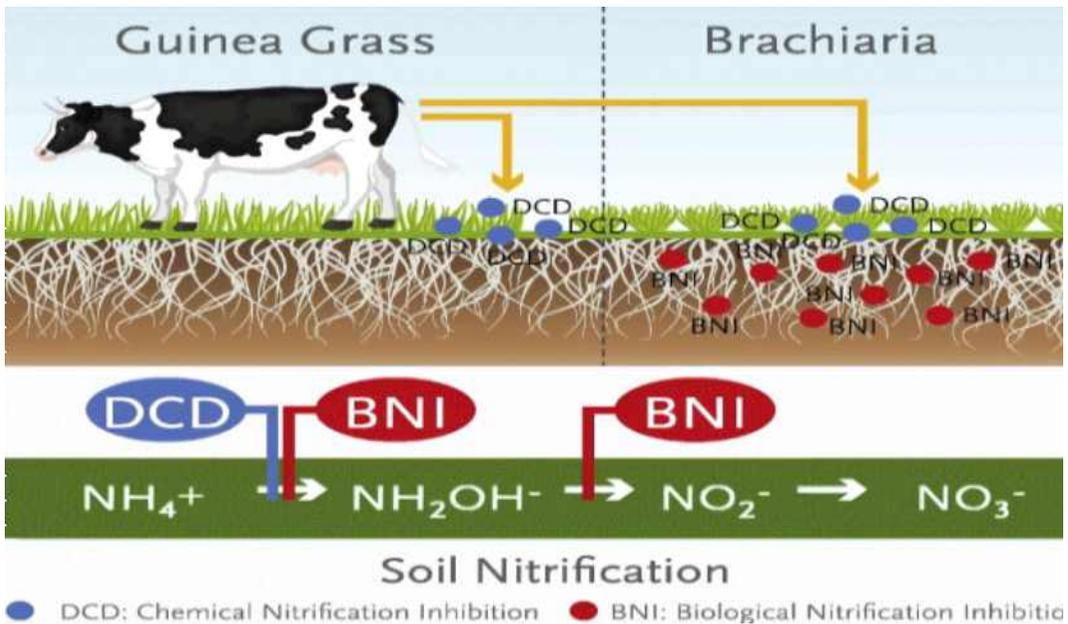


그림 1-17. 토양 내 질산화과정

- 요소분해 억제제 처리에 따른 암모니아 및 온실가스 배출저감 효과가 주로 작물 생육과정에서 수행 되었으며, 축산분뇨 관리 과정에서의 효과 규명은 미흡함
 - Andosol 토양에서 유안비료에 비해 질산화억제제인 DCS(dyciandiamide; N-2,5- dichlorophenyl succinamic acid) 처리에 의해 75% 저감되었고, 밀 재배에서 요소비료에 비해 ECC (nitrification inhibitors coated calcium

carbide)와 DCD 처리에서 아산화질소 배출이 각각 45%, 53% 감소하였음

- 요소분해효소억제제 (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide)는 현재 널리 사용되고 있는 요소분해 억제제로서 요소원으로 소의 오줌을 사용하고 요소분해효소억제제를 시용한 연구 결과, 암모니아 발생이 49% 저감됨(Pereira et al., 2013)

- 바이오차 및 바이오차+요소분해억제제 처리로 요소 단독처리에 비해 토양으로 부터의 암모니아 배출량이 각각 27%와 69% 감소됨(Khadim et al., 2021)

- 요소분해효소억제제가 암모니아의 발생을 억제하더라도, 암모니아는 사라지는 것이 아닌 생성이 억제되는 것이므로, 토양 내 총 질소량은 동일함

- 축적되어있던 암모니아가 추후에 문제를 발생할 수 있으므로, 축적되는 암모니아에 대한 문제점과 해결방안 제시가 필요한 실정임
- 암모늄 이온(NH_4^+)은 식물이 직접 흡수할 수 있는 무기질소 중 하나로 성장과 수확량 생산에 중요하며, 요소분해효소억제제는 암모니아(NH_3) 발생이 억제되고 이온 형태(NH_4^+)로 유지하므로M 작물에 비료를 살포할 때 요소분해효소억제제 시비를 사용하는 것이 성장과 수확량 증대에 유익함
 - 작물에서 암모늄의 활용이 증가하며, 이에 따라 암모늄 독성과 토양 pH 저하를 초래할 수 있는 과도한 암모늄이 농축되지 않음
 - 요소비료와 요소분해효소억제제를 함께 사용하는 것이 식물이 질소를 이용하는데 있어 요소비료만 사용하는 경우와 크게 차이가 없으며, 작물의 수확량에 큰 영향을 미치지 않고 오히려 곡물 수확량을 개선시키는 효과를 보여줌(Marcelo et al. 2014)

■ 화학비료/퇴비 사용 매뉴얼

- 국립농업과학원의 작물별 시비처방 기준(2022)에 따르면 주요 사료작물들에 대한 질소 및 종류별 퇴비 사용량이 제시되어 있음

표 1-2. 작물별 시비처방 기준(2022)

(단위 : kg/10a)

작물명	질소	우분퇴비	볏짚퇴비	돈분퇴비	계분퇴비	혼합가축분 퇴비
청예용 옥수수	20	2,000	2,000	440	340	760
청예용 수수류	25					
청보리	12					
호밀	12					
귀리	14					
피	8					
이탈리안라이그라스	20					
케나프	8.7					

[국립농업과학원, 2022]

■ 퇴비의 생성 과정 및 퇴비 내 양분의 양 파악

- 한우분뇨의 특징은 분뇨 내의 오염물질 농도 생물학적 산소 요구량(BOD₅) 기준으로 한우 분과 뇨가 각각 27,260mg/L, 8,686mg/L에 해당됨
- 한우 분과 뇨의 비효성분 농도는 질소 기준 각각 0.50%, 0.68%에 해당됨
- 한우 분퇴비의 적정 수분함량은 70% 이하여야 하며 부숙도 정도는 환경부와 농식품부의 장관과 협의하여 정하는 고시하는 기준에 적합하여야 함 (농촌진흥청, 2019.)
- 실험에 사용한 한우 퇴비의 비효성분 N 농도는 1.13%에 해당하며 수분함량은 52.60%에 해당함
- 2021년 한우자조금의 한우분뇨가 환경오염에 미치는 영향 연구에 따르면 한우퇴비의 질소함량은 1.05%에 해당하며 실험에 사용된 퇴비 성분과 유사함

- 한우 퇴비의 가축분뇨 퇴비화 과정은 부록에 첨부하였음
- 여러 나라에서 암모니아 배출 규제를 위한 정책적인 관심이 증가하고 있으며 암모니아 배출 저감을 위한 방안 중 하나가 요소비료 및 가축분뇨와 함께 요소분해효소 저해제 처리임 (Jens et al., 2018)
 - 이에 따라 우리나라 토양 및 축산분뇨 특성을 고려한 암모니아 배출에 미치는 요소분해효소 저해제 처리 효과 평가가 필요함
- 우리나라는 미세먼지 관리 종합대책을 통해 배출 저감을 위한 로드맵을 수립하였으며, 고농도 미세먼지 발생이 예상되는 12월부터 3월까지 평상시보다 강력한 배출 저감과 관리 조치를 취해 고농도 미세먼지 발생을 완화하기 위한 미세먼지 계절 관리제를 실시하고 있음
 - 부문별 배출저감 대책으로 생활부문에 농촌 지역 영농폐기물 및 잔재물 불법 소각을 줄이기 위한 영농인의 참여 유도가 있음
 - 미세먼지 생성과 악취의 요인인 암모니아 발생을 줄이기 위한 축산분야의 효율적인 대응책 마련이 요구됨
- 축산업의 지속적 성장을 위해서는 자원순환 및 농업환경 보전 측면에서의 효율적이고 현장에 적용 가능한 가축분뇨 활용 기술이 필요함
 - 가축분뇨 관리 과정에서의 요소분해 효소 및 질산화 억제제 시용에 따른 온실가스 배출 저감 효과를 규명함으로써 순환바이오경제 개념의 저탄소 농업기술을 제시하고자 함
 - 환경보전 및 건강 보호를 위한 국가적 노력에 대한 농업분야의 적극적인 기여로 친환경 성장 기반 기술 제공이 요구됨

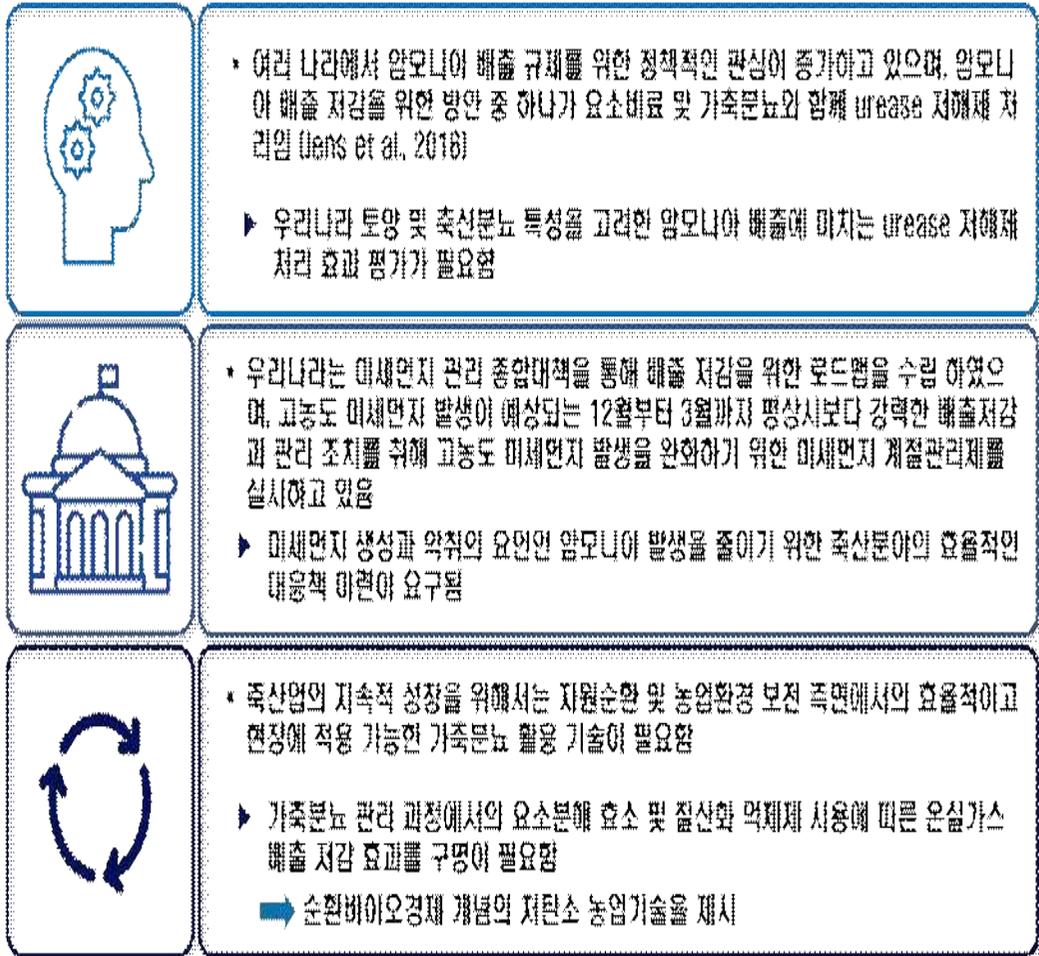


그림 1-18. 암모니아 (NH₃) 발생 저감 방안의 문제점

제2절. 본 연구의 차별점

- 우리나라의 토양 및 기후환경 조건에서 가축분퇴비의 화학적 특성에 맞는 암모니아 배출 저감 방안을 개발함으로써 국내 환경문제 개선 및 축산업에 대한 대국민 인식 개선
 - 국내 축산업의 지속적 발전을 위한 정책 추진의 기초자료 제공
 - 가축분뇨의 활용에 따른 자원순환에 따른 질소이용효율 개선 방안을 제시함으로써 재배 농가에의 경영비 저감에 도움

- 퇴비에서 발생하는 암모니아와 농경지 내 퇴비 사용에서 나오는 암모니아에 대한 관계 연구
 - 농경지에서 사용하는 퇴비와 화학비료의 암모니아 배출에 대한 연구를 통하여 농경지 발생 암모니아의 주요 원인에 대한 규명
 - 퇴비 부숙 과정에서 발생하는 암모니아에 대한 조사 수행을 바탕으로 농경지에서 발생하는 암모니아의 주요 원인을 분석하여 암모니아 배출 저감 방안 연구

제3절. 연구 필요성

- 농업(축산, 비료)이 악취 및 미세먼지의 원인 물질인 암모니아 발생의 주범이란 부정적 인식에 대한 대응기술 개발이 요구됨
- 축산분뇨는 자원순환을 통한 양분으로서의 가치 부여와 무기질 비료 대체를 통한 온실가스(탄소) 배출 저감이라는 긍정적 효과를 지니고 있음에 따라 순환바이오경제 개념의 지속 가능한 자원이용 효율화를 통한 기후변화 대응 방안 모색
- 한우분 퇴비와 무기질 비료 형태로 농경지에 사용된 질소 성분의 암모니아 휘산으로 인한 낮은 양분 이용 효율 및 암모니아 발생 문제 해결을 위한 방안이 필요함

인식개선	농업 (축산, 비료)이 악취 및 미세먼지의 원인물질인 암모니아 발생의 주범이란 부정적 인식에 대한 대응기술 개발이 요구됨
자원재순환	축산분뇨는 자원순환을 통한 양분으로서의 가치 부여와 무기질 비료 대체를 통한 온실가스 (탄소) 배출 저감이라는 긍정적 효과를 지니고 있음에 따라 순환바이오경제 개념의 지속 가능한 자원이용 효율화를 통한 기후변화 대응 방안 모색
암모니아 발생 저감	한우분퇴비와 무기질 비료 형태로 농경지에 사용된 질소 성분의 암모니아 휘산으로 인한 낮은 양분 이용 효율 및 암모니아 발생 문제 해결을 위한 방안이 필요함

그림 1-19. 연구의 필요성

제4절. 연구목적 및 방법

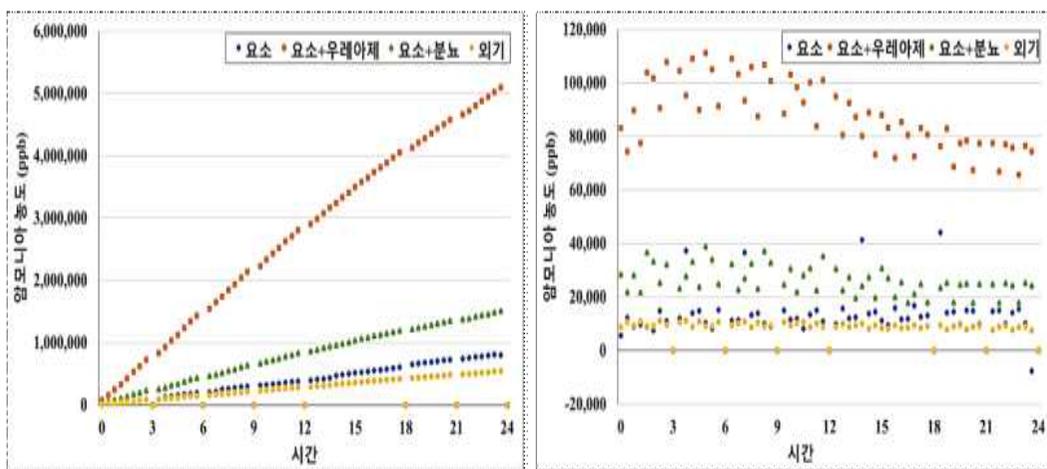
1. 연구목적(목표)

■ 목적

- 한우 퇴비 사용 시 경작지에서 암모니아 배출원 규명 및 저감법 연구

■ 목표

- 경작지 암모니아 배출원 및 배출과정 조사
- 한우 퇴비 사용에 대한 소비자 인식 개선 자료 도출
- 한우분뇨 퇴비의 토양 시용 방법에 따른 암모니아 배출량 평가
- 요소분해효소 억제제(NBPT) 및 바이오차 처리에 따른 축산분뇨 활용 과정에서의 암모니아 가스 발생 저감 효과 구명
- 한우 퇴비 사용에 대한 소비자 인식을 위한 기초자료 제공



〈시간에 따른 암모니아 농도〉

〈시간에 따른 암모니아 발생량〉

(Unpublishedlab data, 2023)

그림 1-20. 요소, 우레아제 및 분뇨의 암모니아 발생량

2. 연구내용 및 방법

(1) 연구내용

- 경작지에서 암모니아 배출원 및 배출과정 조사

- 요소분해효소 억제제 (NBPT) 및 바이오차 처리에 따른 암모니아 배출 저감 효과

- 한우분뇨 퇴비를 토양에 시용하였을 때의 암모니아 배출량 평가

- 요소분해효소 억제제 (NBPT) 및 바이오차 처리에 따른 토양 내에서의 질소 순환에 미치는 영향 평가
 - 농경지 토양에 시용된 한우분뇨의 질소 무기화 과정에서의 암모니아 배출 저감 효과 구명

- 암모니아 발생 저감 효과 구명을 위하여 토양으로부터의 경시적인 가스 발생량 평가
 - 요소분해 억제제 처리에 따른 요소의 가수분해 속도를 낮추어 미세먼지 생성의 전구체인 암모니아 발생 저감 효과 구명
 - 바이오차 처리에 따른 요소의 무기화 과정에서의 암모니아 발생을 억제함으로써 대기중으로 암모니아 배출에 미치는 효과 구명

- 암모니아 발생에 미치는 토양 특성 구명
 - 무기질비료와 한우분 퇴비를 동일한 양의 질소 기준으로 토양에 처리할 경우 유기물 함량 차이로 인한 가스 발생량 비교, 평가

- 암모니아 발생 저감 효과 규명을 위하여 토양으로부터의 경시적인 가스

발생량 평가

- 암모니아 발생에 미치는 토양 특성 규명
- 연구 결과 확산을 위한 소비자 홍보 방안

(2) 연구방법

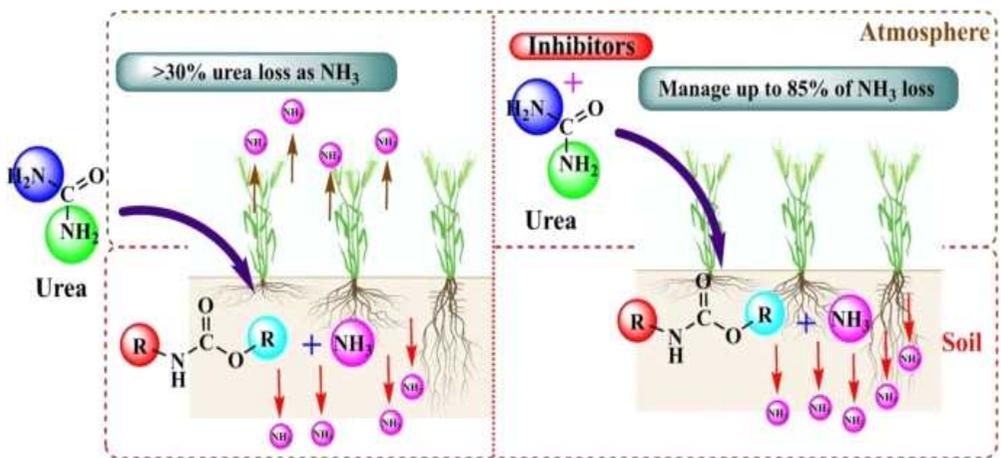
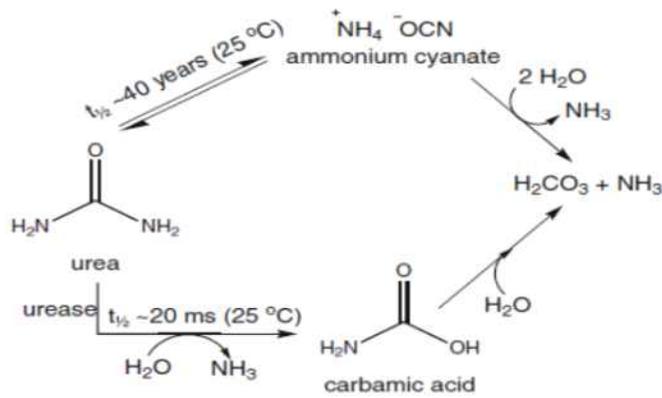
- 경작지의 암모니아 배출원 및 배출과정 조사
 - 국내·외 참고문헌 조사를 통해 경작지 암모니아 배출원 및 배출과정 조사
- 요소분해효소 억제제 및 바이오차 처리에 따른 영농 현장에서의 암모니아 가스 발생 양상을 평가하기 위하여 실내실험 및 야외 포장조건에서 수행

제2장. 한우 퇴비 사용 시 경작지에서 암모니아 배출원 규명 및 저감법 연구

제1절. 퇴비와 요소분해효소의 암모니아 발생 영향 규명

<Take home message>

- 요소의 분해과정을 통해 두 개 분자의 암모니아(NH₃)와 한 분자의 카르보닉산(H₂CO₃)이 생성되므로 이 과정을 요소분해효소(NBPT) 저해제를 첨가하여 암모니아 생성 저감 효과를 평가



(source: Asim et al., 2021)

1. 퇴비와 요소비료의 암모니아 발생정도 파일럿 테스트

(1) 실험방법

- 실험장소: 실내시험(포트시험)
- 처리내용: 무처리(대조구), 요소(Urea), 요소+요소분해효소억제제, 한우분퇴비, 한우분퇴비+요소분해효소억제제
- 처리량: 요소 ($10 \text{ kg N } 10\text{a}^{-1}$ *), 한우분 (요소처리구와 동일 질소량), 요소분해효소억제제 (2 g N kg^{-1})
*청예용옥수수 밀거름 양
- 조사기간: 처리 후 2개월
- 분석방법:
 - 암모니아 배출량: 챔버 설치 후 레이저 자동측정기

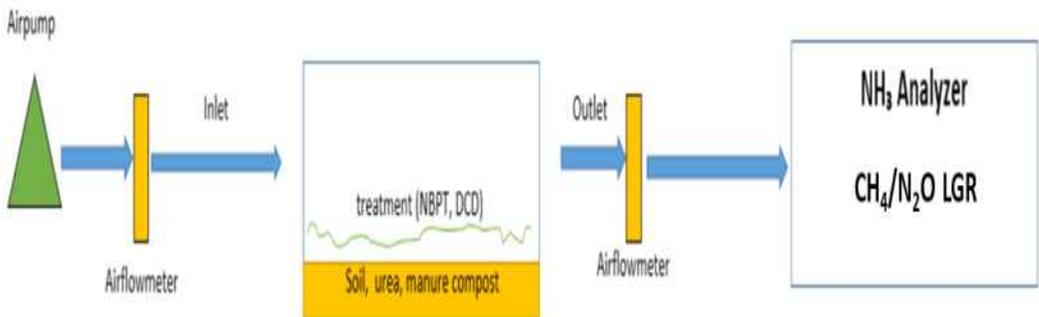


그림 2-1. 레이저 자동측정기 측정 방법

- 측정 항목 : 암모니아
- 측정 시간 : 1회/67-68초
- 측정 거리 : 0.5 m 이내

- 사용된 튜브 규격 : 1/4인치, 1/16 인치 Teflon Tube
- 레이저 분석기기를 이용하여 현장에서 바로 분석
- 최대 16곳에서 연속 샘플링 가능하므로 각 샘플별 포트에 담아서 측정 진행
- 진공펌프를 통해 샘플링한 가스를 최대 1회/67-68초의 속도로 분석(수십 ppb 수준의 분석능)
- 샘플 챔버를 Closed 챔버의 형태로 제작을 하였기 때문에 배출 농도에 면적을 나누어서 발생량을 계산함
- 토양 화학성: 토양 및 식물체 분석법 (농업과학기술원, 2000)
- 토양 pH, EC: 토양과 증류수를 1:5의 비율로 측정(EC의 경우 측정값을 단위환산)
- 토양유기물: Tyurin법, 유효 인산: Lancaster법
- 교환성 양이온: 1 M NH₄OAC (pH 7.0)으로 추출하여 유도결합플라즈마 분광광도계 (ICP-OES, GBC, Integra XL Dual, Braeside, Australia)로 분석

■ 실내 실험 과정



암모니아 분석 장비

흙 샘플 준비

측정 포트(Pot) 준비



(1) 흙+시료 투입

(2) 1분간 교반

(3) 효소 활성화 및
강수량 고려 물 투입

(4) 밀폐 후 측정 시작

그림 2-2. 암모니아 분석 장비 및 실험 셋팅 사진

(2) 조사내용

■ 처리후 시간 경과에 따른 암모니아 농도

■ 실험 전후 토양화학성(질소, 유기물), 한우분 퇴비 질소함량

(3) 연구결과

가. 암모니아 발생량 측정 결과

■ 토양수분 상태에 따른 요소분해효소 억제제(NBPT) 처리 효과

- 토양이 건조한 상태에서 퇴비 처리구의 요소분해효소 억제제 처리로 암모니아 발생 저감 (퇴비 : 퇴비+요소분해효소 억제제, 퇴비+요소 : 퇴비+요소+요소분해효소 억제제)
- 퇴비 처리구에 비해 퇴비+요소 처리구에서 암모니아 발생이 높았음
- 퇴비 중에 함유된 요소분해효소의 영향으로 요소의 암모니아 발생 촉진으로 추정됨
- 토양이 습한 상태에서는 처리 간 차이가 없어 요소분해효소 억제제 처리에 따른 암모니아 발생 저감 효과가 적었음

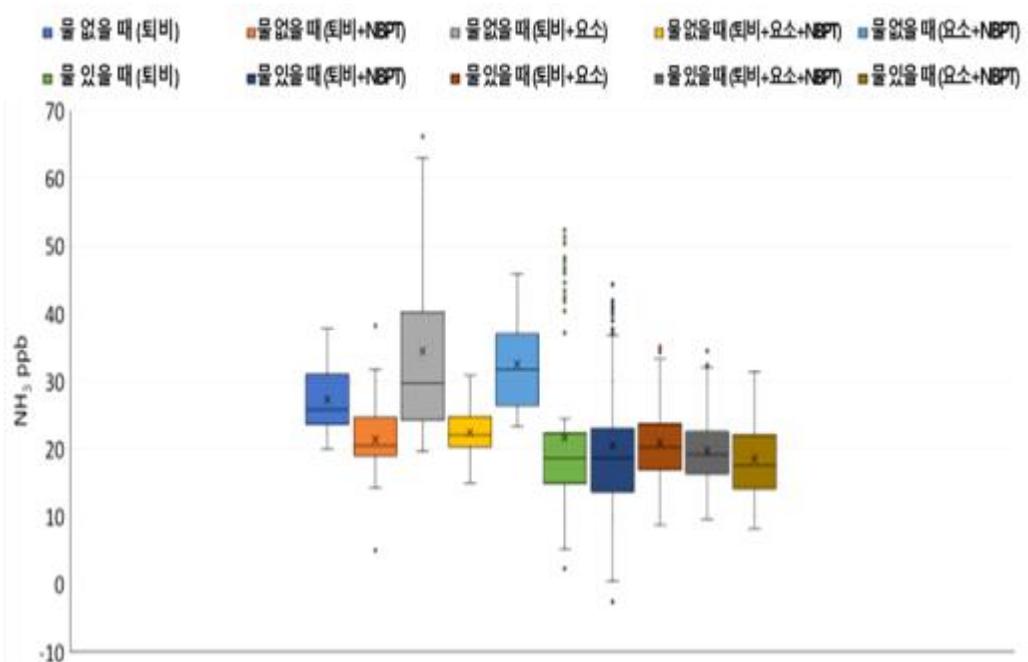


그림 2-3. 토양수분 상태에 따른 요소분해효소 억제제 처리 효과

■ 처리별 초기 (처리 후 1일 이내) 암모니아 발생량 평가

- 요소에 요소분해효소처리로 암모니아 발생량이 증가 (요소 < 요소+요소분해효소)
- 요소+퇴비 혼용으로 퇴비 처리 및 요소 처리보다 암모니아 발생 증가
 - 요소+퇴비혼용구의 암모니아 발생은 처리량이 많을수록 크게 증가
 - 요소분해효소억제제 처리 및 바이오차 처리로 암모니아 발생이 저감

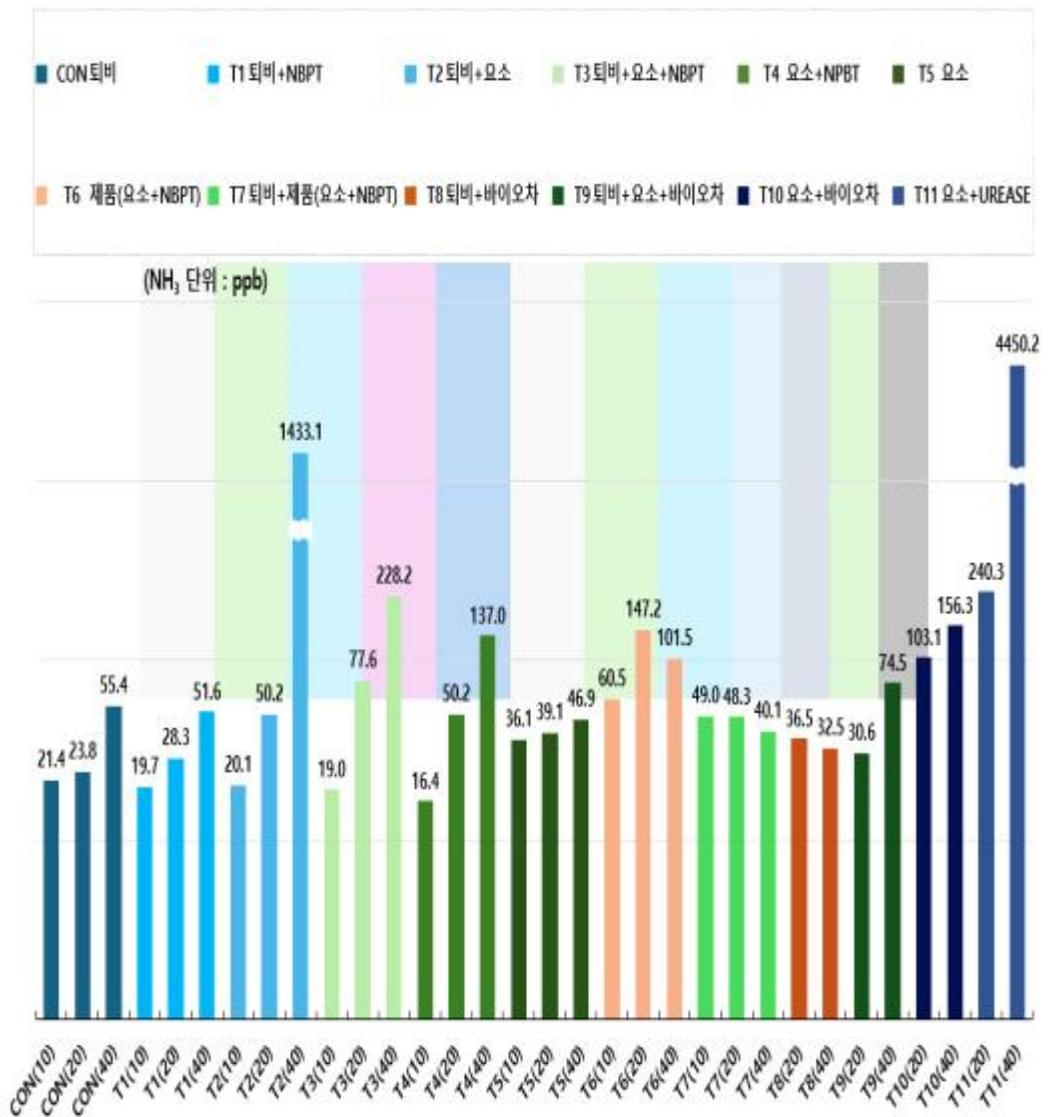


그림 2-4. 처리별 암모니아 발생량 평가

■ 질소 사용 형태별 암모니아 발생 (20 kg N/10a 처리)

- 퇴비와 요소 혼용 처리 토양에서의 암모니아 발생량이 가장 높았음
- 처리 1일 경과 후 질소 사용 형태별 암모니아 발생량은 혼용처리>요소>퇴비순이었음

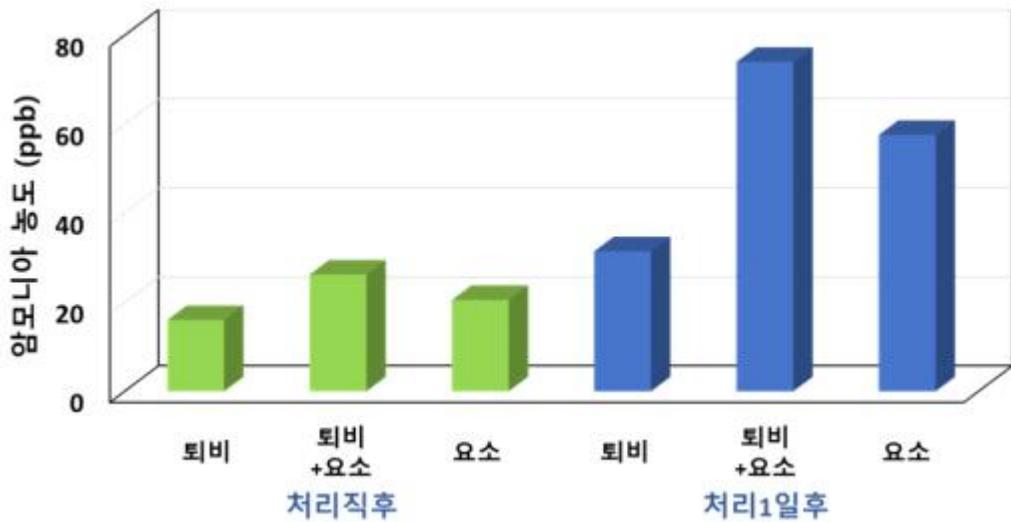


그림 2-5. 질소 사용 형태별 암모니아 발생 (20 kg N/10a 처리)

- 퇴비+요소 혼용처리구 질소 시용 농도별 암모니아 발생에 미치는 요소분해효소 억제제(NBPT) 처리 효과
 - 퇴비와 요소를 함께 처리한 경우, 질소 농도가 높을수록 요소분해효소 억제제 처리에 따른 암모니아 발생 저감 효과가 크게 나타났음
 - 저농도 질소 처리(10kg/10a)의 경우, 7일 후에는 요소분해효소 억제제 처리 효과가 나타나지 않았음

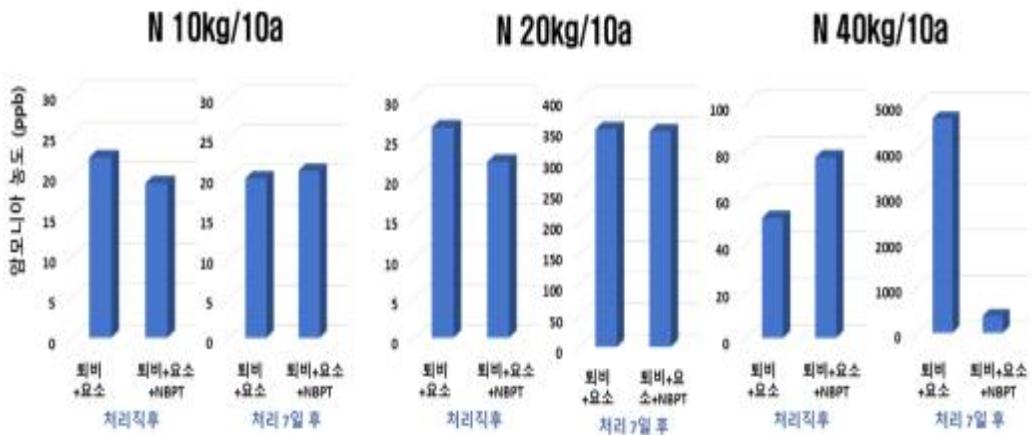


그림 2-6. 퇴비+요소 혼용 처리구 질소 시용별 암모니아 발생에 미치는 요소분해효소 억제제 처리 효과

- 퇴비+요소 혼용 처리구의 요소분해효소억제제 처리 형태별 암모니아 발생
 - 질소 시용 농도가 낮은 경우(10 kg N/10a)에는 순수한 요소분해효소 억제제 처리가 암모니아 발생 저감 효과가 좋았으나 처리 1일 경과 후에는 20 kg N/10a 이상에서는 요소분해효소 억제제가 함유된 요소 처리로 저감 효과가 좋게 나타났음

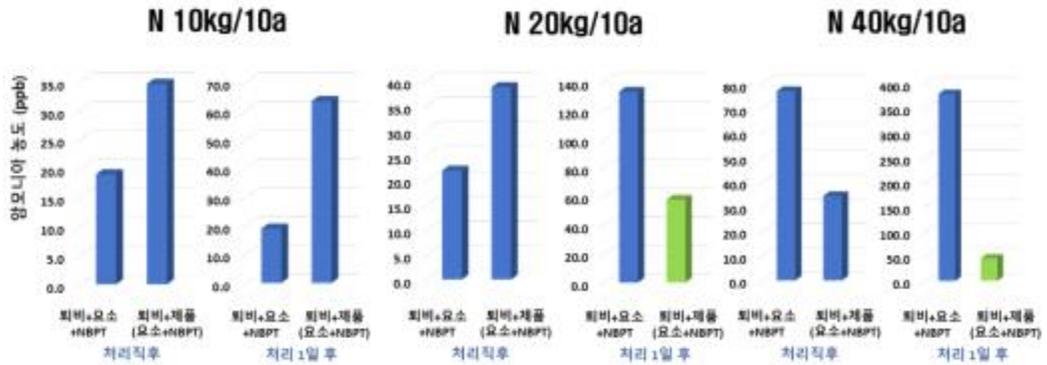


그림 2-7. 퇴비+요소 혼용처리구의 요소분해효소 억제제처리 형태별 암모니아 발생

■ 질소 시용형태별 바이오차 처리에 따른 암모니아 발생

- 바이오차 처리에 따른 암모니아 발생 저감 효과는 요소 처리구 보다 퇴비 처리구에서 상대적으로 오래 지속되었음
- N 20 kg/10a구에서는 처리 1일 경과 후 요소 처리구에서 효과가 감소하였음
- N 40 kg/10a구에서는 처리 1일 경과 후 요소 처리구 및 요소+퇴비 처리구에서 효과가 감소하였음



그림 2-8. 질소 시용 형태별 바이오차 처리에 따른 암모니아 발생

■ 처리별 초기 (처리 후 1일 이내) 암모니아 발생 저감제 효과 평가

- 퇴비+요소 처리구에서는 바이오차 처리가 요소분해효소 억제제 처리보다 암모니아 발생 저감에 효과가 큼
- 요소 처리구에서는 상대적으로 요소분해효소 억제제 처리가 암모니아 발생 저감에 효과적이었음

표 2-1. 처리별 초기 (처리 후 1일 이내) 암모니아 발생 저감제 효과 평가

(단위 : ppb)

처리명	퇴비		퇴비+요소		요소	
	NBPT	바이오차	NBPT	바이오차	NBPT	바이오차
20 kg N/10a	28.3	36.5	77.6	30.6	50.2	103.1
40 kg N/10a	51.6	32.5	228.2	74.5	137.0	156.3

표 2-2. 1차 실험 각 처리구별 암모니아 농도의 유의성 분석

0.05 수준으로 유의적 분석을 하였으며 유의적 차이가 있는 경우는 *** 로 표시함				
처리구간 비교	Difference Between Means	Simultaneous 95% Confidence Limits		
4 - 2	405.99	318.49	493.48	***
4 - 3	435.50	348.48	522.52	***
4 - 1	624.46	516.81	732.11	***
4 - 6	646.16	481.24	811.08	***
4 - 5	670.12	505.20	835.04	***
2 - 4	-405.99	-493.48	-318.49	***
2 - 3	29.51	-58.01	117.03	
2 - 1	218.47	110.42	326.52	***
2 - 6	240.17	74.99	405.36	***
2 - 5	264.13	98.95	429.31	***
3 - 4	-435.50	-522.52	-348.48	***
3 - 2	-29.51	-117.03	58.01	
3 - 1	188.96	81.29	296.63	***
3 - 6	210.66	45.73	375.60	***
3 - 5	234.62	69.69	399.55	***
1 - 4	-624.46	-732.11	-516.81	***
1 - 2	-218.47	-326.52	-110.42	***
1 - 3	-188.96	-296.63	-81.29	***
1 - 6	21.70	-154.98	198.39	
1 - 5	45.66	-131.03	222.35	
6 - 4	-646.16	-811.08	-481.24	***
6 - 2	-240.17	-405.36	-74.99	***
6 - 3	-210.66	-375.60	-45.73	***
6 - 1	-21.70	-198.39	154.98	
6 - 5	23.96	-192.44	240.36	
5 - 4	-670.12	-835.04	-505.20	***
5 - 2	-264.13	-429.31	-98.95	***
5 - 3	-234.62	-399.55	-69.69	***
5 - 1	-45.66	-222.35	131.03	
5 - 6	-23.96	-240.36	192.44	

처리구 : 1 = 대조구(흙) / 2 = 요소 / 3 = 퇴비 /

4 = 퇴비+요소 / 5 = 퇴비+요소분해효소억제제 / 6 = 퇴비+바이오차

나. 처리별 토양화학성 변화

■ 시험 전 토양화학성

- 토양 pH는 7.6으로 우리나라 밭 토양의 평균값 6.4에 비해 높았으며, EC는 0.4로 낮은 값을 보였음.
- 총질소는 1.1 g/kg으로 C/N비가 7.9로 비교적 낮은 토양임. C/N비가 낮을 경우, 질소 손실로 비료 효과가 저하될 우려와 함께 암모니아 등 가스 발생의 우려가 큼
- 유효인산은 293 mg/kg으로 밭토양 평균치 657 mg/kg 보다 훨씬 낮은 값을 보였는데 이는 우리나라 밭토양의 적정범위 300~550 mg/kg 보다도 낮은 값으로 인산 축적이 안된 상태임
- 교환성 양이온은 K, Ca 및 Mg가 각각 0.47, 4.23, 1.21 cmol/kg으로 평균값 0.96, 7.6 및 2.07 cmol/kg 보다 낮음

표 2-3. 시험 전 토양화학성

구분	pH	EC	OM	T-N	Av.P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	C/N
	(1:5)	(dS/m)	(g/kg)	(g/kg)	(mg/kg)	--- (cmol/kg) ---			
시험토양	7.6	0.4	22.4	1.1	293	0.47	4.23	1.21	7.9
우리나라 밭토양 평균*	6.4	1.03	27.3		657	0.96	7.6	2.07	
적정범위	6.0~7.0	≤2.0	20~30		300~550	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	

*한국토양비료학회, 2018

■ 시험후 처리별 토양화학성

- 요소분해효소 억제제 처리에 따른 시험 후 처리별 토양화학성 변화는 뚜렷한 경향을 보이지 않았음

표 2-4. 요소분해효소억제제 처리에 따른 시험 후 토양화학성

처리명	pH	E.C	OM	Av.P ₂ O ₅	T-N	C/N
	(1:5)	(dS/m)	(g/kg)	(mg/kg)	(g/kg)	
퇴비	7.4	0.7	24.3	288	0.9	10.7
퇴비+NBPT	7.6	0.6	19.3	337	1.1	9.5
퇴비+요소	6.1	1.0	20.9	272	0.9	8.9
퇴비+요소+NBPT	6.1	1.3	19.0	260	1.0	10.7
요소	6.3	1.6	21.7	279	1.4	7.2
요소+NBPT	5.9	1.7	17.8	252	1.5	5.9

- 시험 후 토양 중 C/N비는 퇴비 > 퇴비+요소 > 요소 순으로 퇴비 처리로 토양 중 유기물 함량이 상대적으로 많아짐

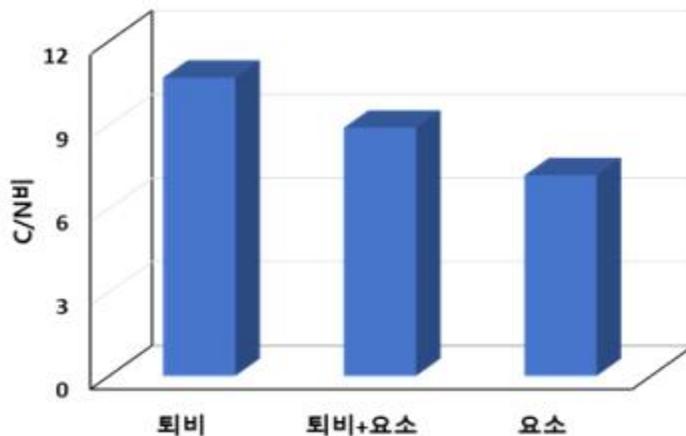


그림 2-9. 처리별 토양 C/N비

- 요소분해효소 억제제 처리로 퇴비처리 및 요소처리 모두 C/N비가 낮아짐

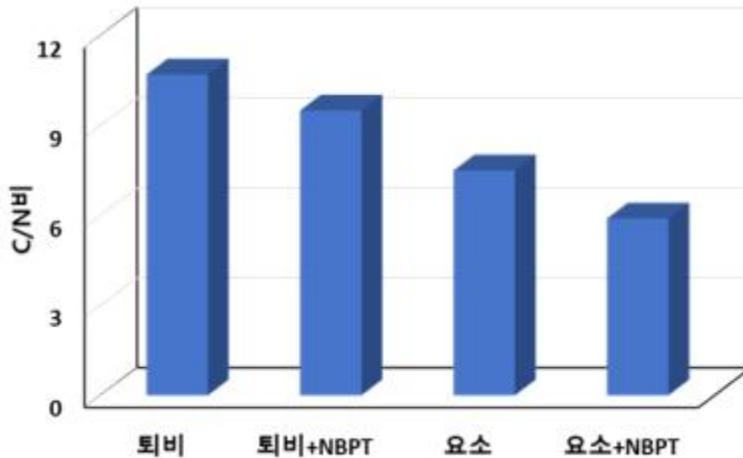


그림 2-10. 요소분해효소억제제 처리별 토양 C/N비

- 바이오차 처리에 따른 시험 후 처리별 토양화학성 변화는 유효인산 함량이 증가하는 경향을 보임

표 2-5. 시험 후 토양화학성 분석 결과

처리명	Ph	EC	OM	Av.P ₂ O ₅	T-N	C/N
	(1:5)	(dS/m)	(g/kg)	(mg/kg)	(g/kg)	
퇴비	7.4	0.7	24.3	288	0.9	10.7
퇴비+바이오차	8.0	0.9	22.4	419	0.9	11.1
퇴비+요소	6.1	1.0	20.9	272	0.9	8.9
퇴비+요소+바이오차	6.3	2.2	22.3	329	1.3	7.7
요소	6.3	1.6	21.7	279	1.4	7.2
요소+바이오차	6.2	1.9	20.9	287	1.5	6.6

- 우분퇴비 단독 처리구의 경우 바이오차 처리로 시험후 C/N비가 미처리구에 비해 높았음
- 우분퇴비+요소 처리 및 요소 처리의 경우에는 바이오차 처리로 모두 상대적으로 C/N비가 낮아짐

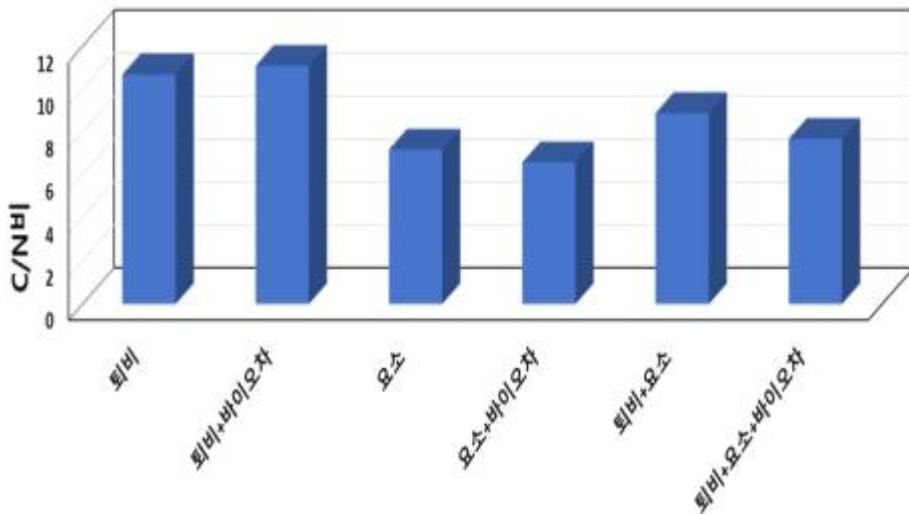


그림 2-11. 바이오차 처리별 토양 C/N비

- 이는 처리구별 질소 함량 차이는 크지 않았으나 유기물 함량에 있어 요소분해효소억제제 처리구에 비해 바이오차 처리구가 상대적으로 높았던 결과로 판단됨

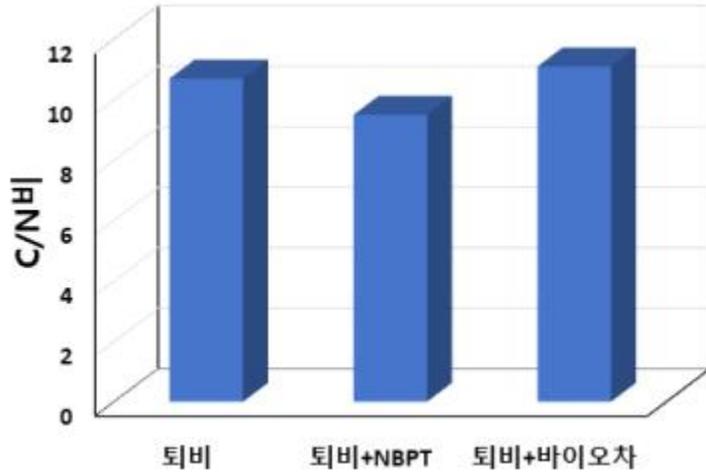


그림 2-12. 퇴비 처리구 경감제 종류별 토양 C/N비

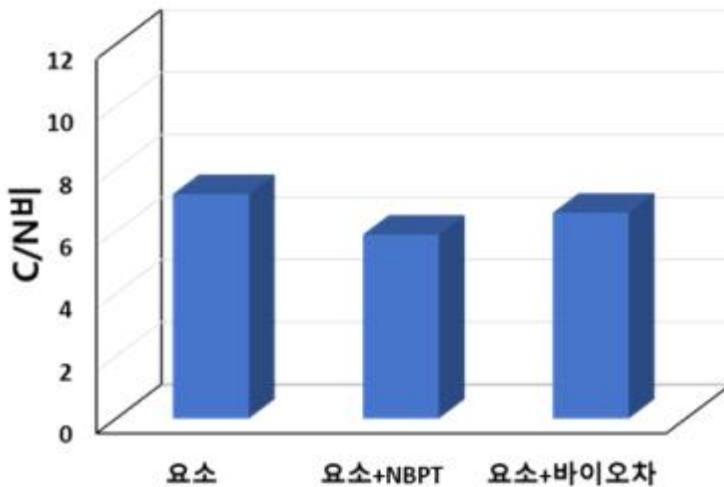


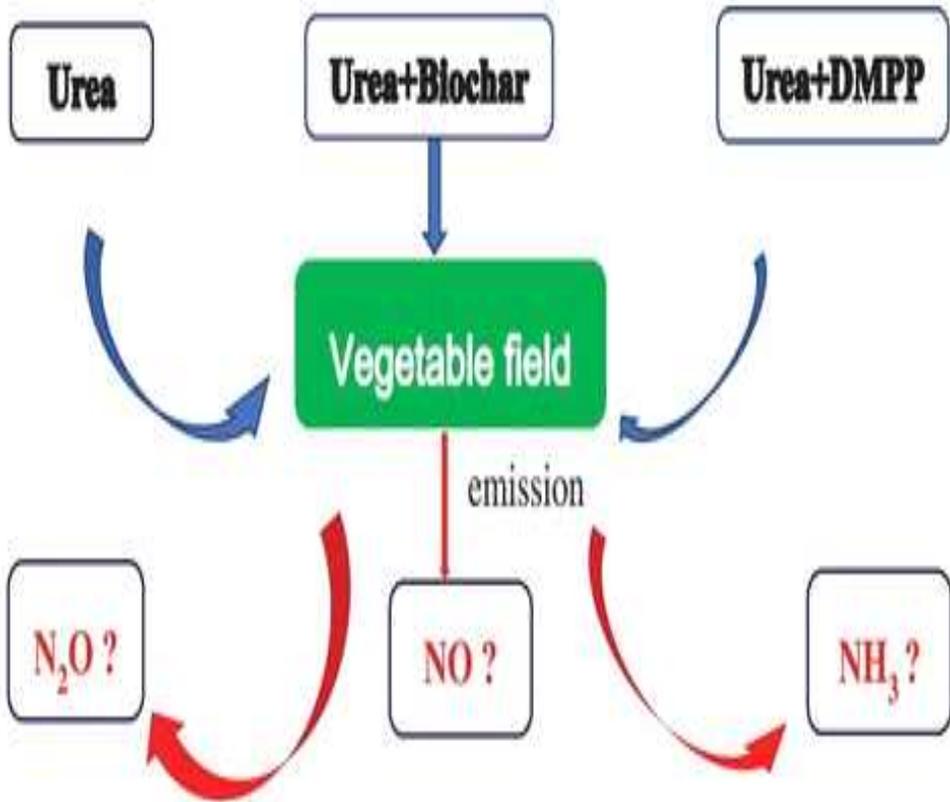
그림 2-13. 요소 처리구 경감제 종류별 토양 C/N비

- 요소분해효소억제제 처리 및 바이오차 처리에 따른 시험 후 토양의 C/N비는 바이오차 처리구가 요소분해효소억제제 처리구에 비해 상대적으로 높았음

제2절. 경작지에서의 요소분해효소억제제 및 바이오차 처리에 따른 암모니아 발생 저감 효과 규명

<Take home message>

- 바이오차 처리에 따른 요소의 질소 성분이 암모니아 형태로 휘산되는 양을 저감하는 효과를 규명
- 요소분해효소 억제제 처리한 경우 경작지에서 퇴비+요소 처리구에 비해 22%의 암모니아 발생량을 감소시킬 수 있었음
- 바이오차를 처리한 경우 퇴비+요소 처리구보다 2.60배 암모니아가 더 발생하였으며, 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구보다 3.34 배 암모니아가 더 발생하여 바이오차의 처리가 요소분해효소 억제의 효과가 있다고 보기는 어려움



(source: Liying et al., 2020)

(1) 실험방법

- 실험장소: 경작지 현장 실험 (강원대학교 부설농장)
- 처리내용: 무처리(대조구), 요소(Urea), 한우분퇴비, 한우분퇴비+요소, 한우분퇴비 + 요소분해효소억제제, 한우분퇴비 + 바이오차
- 처리량: 요소 ($40 \text{ kg N } 10\text{a}^{-1}$), 한우분 (요소처리구와 동일 질소량)
*과비 하는 경우를 고려하여 기존 시비량에 2배 처리 진행
- 조사기간: 처리 후 3일 동안의 데이터 변화 관측
- 조사시기: 24시간 간격 (처리후 1일간)
- 분석방법: 챔버 설치 후 레이저 자동측정기
 - 암모니아 배출량 : 챔버 설치 후 레이저 자동측정기

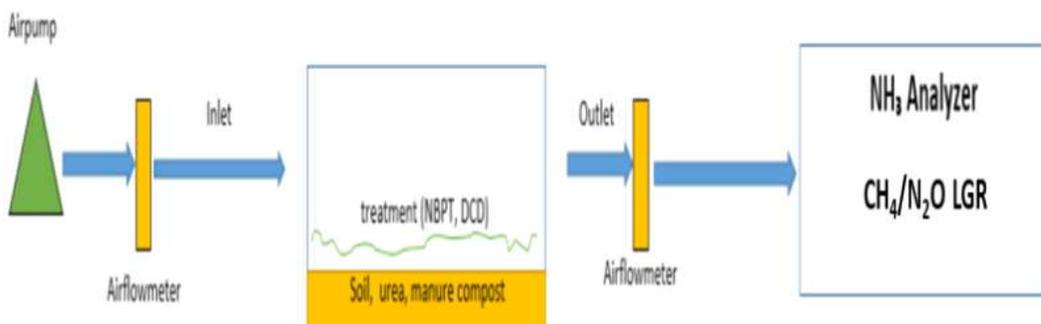


그림 2-14. 레이저 자동측정기 측정 방법

- 측정 거리 : 17.5 m 이내
- 사용된 튜브 규격 : 1/4인치, 1/16 인치 Teflon Tube
- 레이저 분석기기를 이용하여 현장에서 바로 분석
- 최대 16곳에서 연속 샘플링 가능하므로 각 샘플별 포트에 담아서 측정 진행

- 진공펌프를 통해 샘플링한 가스를 최대 1회/67-68초의 속도로 분석(수십 ppb 수준의 분석능)

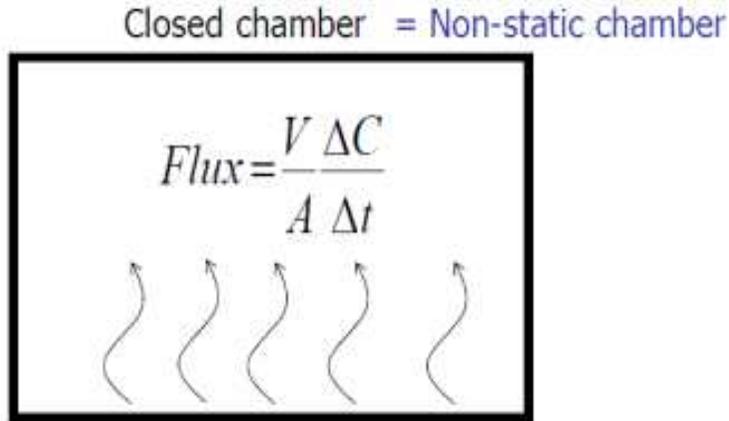


그림 2-15. 실험에 사용된 Closed 챔버법 및 발생량 계산법

(2) 실험내용

- 처리후 시간 경과에 따른 암모니아 농도 각 샘플을 3반복 측정
- 시험 전후 토양화학성(질소, 유기물), 한우분 퇴비 질소함량
- 외부 실험 준비과정
 - 하우스의 경우 면적이 1.62m² 으로 청예 옥수수 시비량 기비 + 웃비 20kg N에 과비하는 경우를 고려하여 2배인 40kg N의 요소비료와 한우분 퇴비를 처리
 - 요소 처리구의 경우 요소비료 140.86 g을 투여하였고, 한우분 퇴비 처리구와 한우분퇴비 + 요소분해효소억제제, 한우분퇴비 + 바이오차의 경우 한우 퇴비 4.595kg을 처리하였으며, 한우분퇴비 + 요소의 경우 2.275 kg의 한우분퇴비와 70.43g의 요소비료를 투여
 - 요소분해효소를 억제하는 효과가 있는 요소분해효소억제제는 0.13g, 바이오차는 324g 투여



그림 2-16. 외부 경작지 하우스 설치



대조구 (흙) 처리구



요소 처리구



- 대조구에 요소분해효소 억제제와 바이오차 처리를 추가적으로 진행함
- 현장에서의 실험 시작 점에서의 외기 농도는 298.31 ± 280.10 ppb

(3) 연구결과

가. 암모니아 발생량 측정 결과

■ 처리구별 암모니아 농도의 평균 차이

표 2-6. 농경지 실험 처리구별 암모니아 농도

(단위: ppb)

처리구	대조구 (흙)	요소	퇴비	퇴비+요소	퇴비+요소 +요소분해 효소억제 제	퇴비+요소 +바이오차
평균	736.78	14,234.63	835.07	3,176.94	2,473.61	8,283.58
표준편차	453.11	16,141.75	607.96	3,583.11	1,145.79	2,110.60

- 대조구의 경우 평균 암모니아 발생 농도가 736.78 ± 453.11 ppb, 외기의 경우는 $1,489.88 \pm 2,660.20$ ppb가 발생하였는데, 요소 및 퇴비+요소 등의 고농도의 가스가 영향을 미치는 것으로 보임
- 고농도 가스의 영향을 제외하였을 경우 외기의 농도는 792.51 ± 473.76 ppb의 암모니아 가스가 발생하여, 대조구와 유의적 차이가 없는 것으로 나타남
- 요소의 경우 처음 2일 동안에는 대조구와 유사한 농도로 측정이 되다가 3일부터 농도가 급상승하기 시작하였고, 7일 이후부터 발생량이 120,000ppb (120ppm) 이상으로 증가하여 암모니아 배출 허용치 기준인

20ppm 보다 6배 많이 가스가 발생함

- 초기 3일까지는 퇴비+요소가 같이 시비되는 경우의 암모니아 농도가 요소만 시비하는 경우, 퇴비만 시비하는 경우에 비해 각각 2.05배, 2.03배 수준으로 농도 차이가 발생하였으나, 약 5일 이후부터 실험 마지막 날까지 요소로부터 발생하는 암모니아 농도가 1.5 ~ 2배 이상 증가하는 것으로 나타남
- 결과적으로 요소 처리구에서 발생하는 암모니아 농도가 퇴비+요소 처리구에 비해서도 4.48배의 암모니아 가스가 배출되었으며, 퇴비 처리구에 비해서 16.69배의 암모니아 가스가 배출되는 것으로 확인되었음
- 퇴비 처리구의 경우 처음 3일 정도까지는 암모니아 가스가 대조구(흙)와 요소 처리구에 비해서 1.8배정도 높게 발생하였으나, 5일 이후부터는 요소 처리구가 4 ~ 16배 이상의 암모니아 가스가 발생하였으며, 17일 이후부터는 대조구(흙) 처리구와는 거의 유사하게 암모니아 가스가 발생하였음
- 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구의 경우 퇴비+요소 처리구에 비하여 처음 3일 정도는 56%의 암모니아 배출량 감소 효과를 보였으나, 시간이 지남에 따라 최종적으로 22% 정도의 암모니아 배출량 감소 효과를 보였음
- 퇴비+요소+바이오차 처리구의 경우 퇴비+요소 처리구에 비하여 처음 3일 정도는 50%의 암모니아 배출량 감소 효과를 보이는 것으로 보였으나, 5일 이후부터는 바이오차를 처리한 처리구에서 퇴비+요소만 처리한 처리구에 비해 암모니아 발생량이 2~7배 수준까지 발생량이 증가하였음
- 가스 발생량은 실험 시작 후 15-17일 이후부터 일정 수준 발생하는 정도로 줄어들었으며, 우천 이후로는 발생량이 50~80% 이하 수준으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었음

■ 처리구별 암모니아 농도의 평균 시각화

(단위 : ppb)

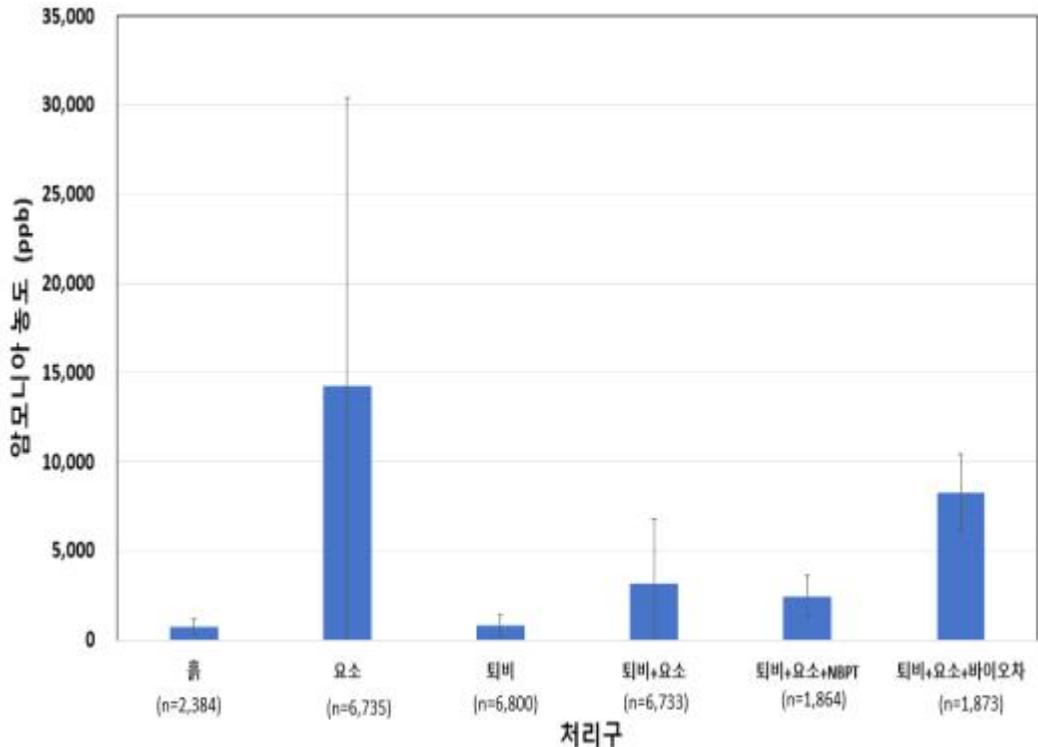


그림 2-18. 처리구별 암모니아 농도 평균

- 대조구(흙)에서 농도가 가장 낮았으며 퇴비 처리구는 대조구와 비슷한 수준의 암모니아가 발생하였고, 요소 처리구에서 가장 많은 암모니아 가스가 배출되었고, 퇴비+요소+바이오차, 퇴비+요소, 퇴비+요소+요소 분해효소억제제 순서로 암모니아가 발생함
- 요소 분해효소 억제제 역할을 하는 요소분해효소 억제제 처리구의 경우 퇴비+요소의 처리구에 비해서 22% 정도의 암모니아 가스 배출이 감소되었음
- 바이오차의 경우 요소분해효소 억제제로서의 효과가 요소분해효소 억제제에 비해서 떨어지며 퇴비+요소를 처리한 경우보다 오히려 암모니아

발생량이 2.61배 더 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 퇴비+요소+요소 분해효소 억제제를 처리한 처리구에 비해서 3.35배 더 많은 암모니아 가스가 발생하는 것을 확인할 수 있었음

1. 대조구(흙) 처리구 암모니아 발생 경향

■ 시간에 따른 처리구별 암모니아 농도 평균

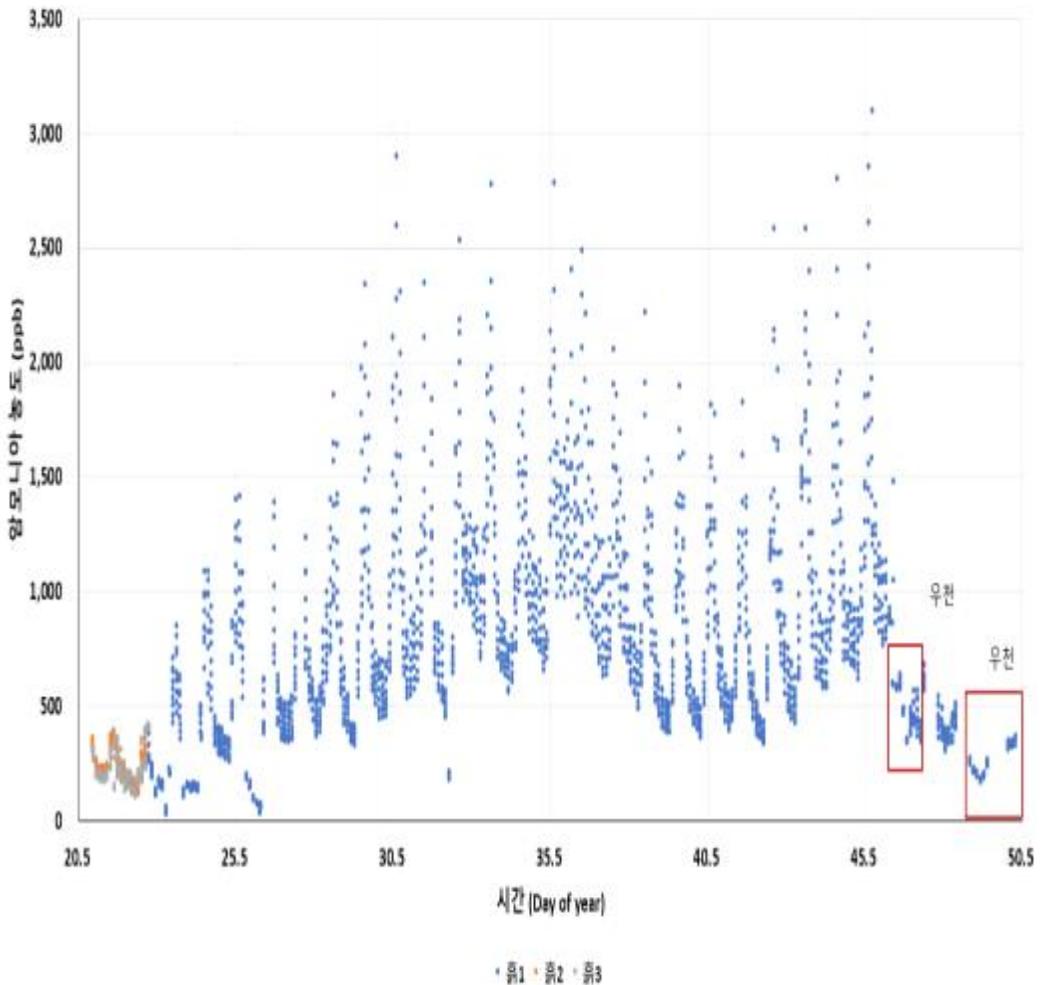


그림 2-19. 대조구(흙)의 암모니아 농도 변화

- 대조구(흙)에서 암모니아 농도는 28 ~ 3,097 ppb 사이의 범위로 측정이 되었으며 3일차부터 농도가 대부분의 처리구가 증가하는 것을 확인할 수 있었음
- 기온이 -10℃로 떨어지면서 농도가 200ppb 밑으로 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며, 암모니아 농도가 pH 뿐만 아니라, 온도에도 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있었음
- 각 날짜별로 xx.5 ~ xx.0 시간대가 낮 시간에서 밤 시간으로 변화 시간대로, 암모니아 발생량은 대체로 낮에 농도가 증가하다가 저녁 시간이 되면 다시 감소하는 것을 확인할 수 있음
- 우천 이후로는 암모니아 발생량이 50~80% 이상으로 감소하는 것으로 확인할 수 있었음

2. 요소 처리구 암모니아 발생 경향

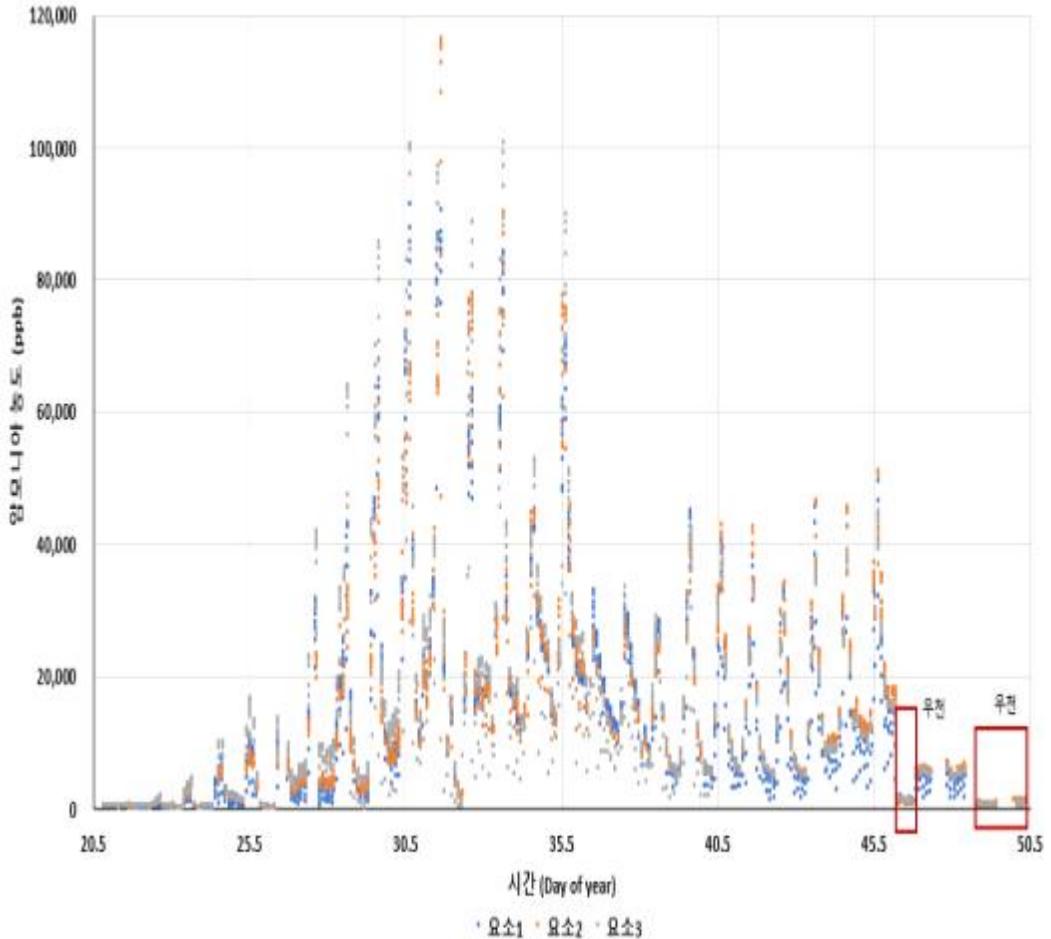


그림 2-20. 요소 처리구의 암모니아 농도 변화

- 요소 처리구의 암모니아 농도는 23 ~ 116,144 ppb 사이의 범위로 측정이 되었으며, 3일차부터 농도가 폭발적으로 증가하여 3일 이전의 평균 값 275ppb에 비해 18~50배 증가한 것을 확인할 수 있었음
- 0일차와 1일차까지는 대조구(흙)의 암모니아 농도와 유사하거나 낮게 측정 되었으나, 2일차부터 1,738ppb 수준의 암모니아 농도가 측정되어 농경지 토양에 요소 비료를 시비하면 2일차 이후부터는 급격하게

암모니아가 발생하여 냄새가 많이 발생할 것으로 예상됨

- 5일 이후부터는 다른 모든 처리구들에 비해서 암모니아 가스 발생량이 가장 높았으며, 15일 이후로도 40~60ppm 사이 농도 수준으로 가스가 발생하여 대기중 배출허용 기준인 12~30ppm 수준보다 2배 이상보다 높게 측정됨(환경부, 2020.)

3. 퇴비 처리구 암모니아 발생 경향

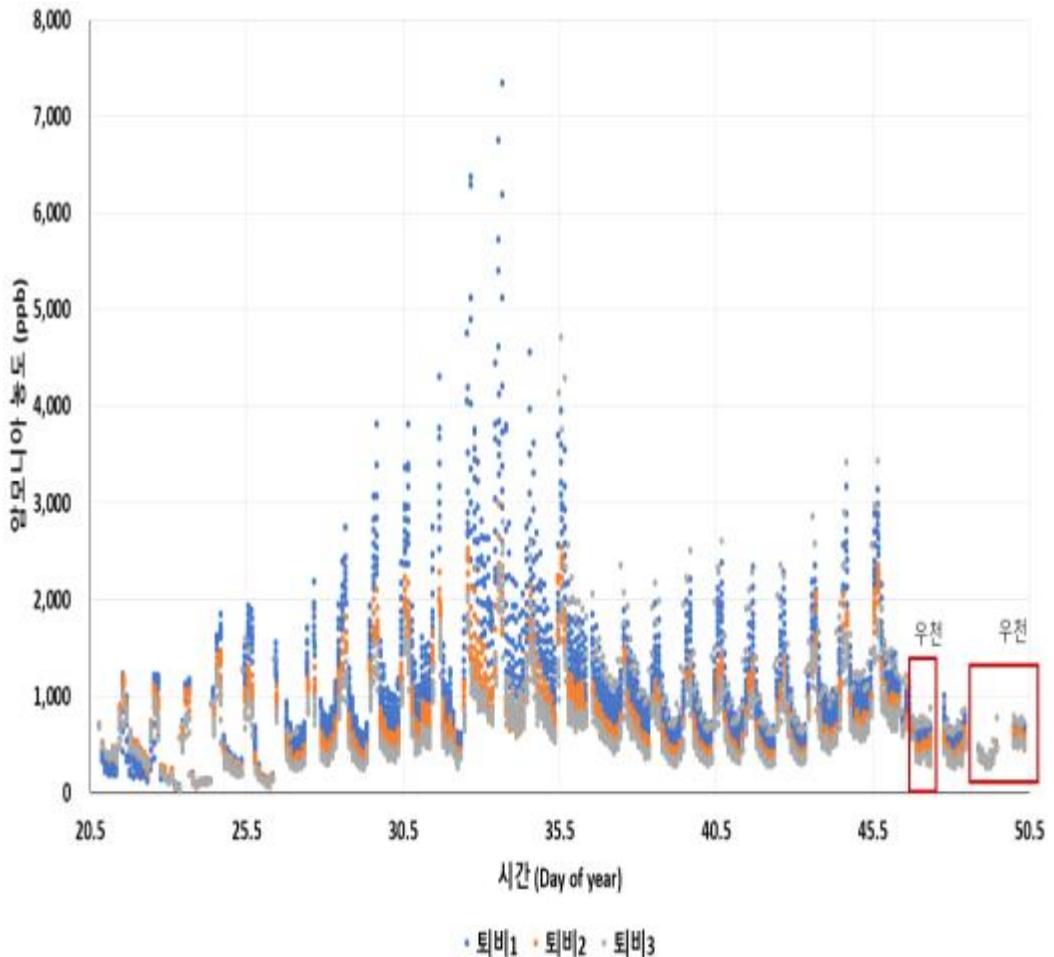


그림 2-21. 퇴비 처리구의 암모니아 농도 변화

- 퇴비 처리구의 농도는 17 ~ 7,340 ppb 사이의 범위로 측정이 되었으며, 1일차부터 농도가 1,000 ppb 이상으로 증가하여 3일 이후까지 꾸준히 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었음
- 퇴비의 경우 실제 농경지 토양에 시비를 하면 0일차부터 농도가 대조구(흙)와 요소 처리구에 비해 각각 2.2배, 1.8배 수준 더 높은 것을 확인할 수 있었으나, 3일차 후에도 농도가 크게 변하지 않고 3일차 이후부터는 오히려 요소 처리구의 1,233ppb보다 2.25배 낮은 수준인 547ppb로 농도가 낮아진 것을 확인할 수 있었음
- 5일차 이후부터 16일차까지 암모니아 농도가 꾸준히 증가하는 경향을 보이다가 17일 이후부터는 대조구(흙) 처리구와 유사하게 암모니아 가스가 발생하였음

4. 퇴비+요소 처리구 암모니아 발생 경향

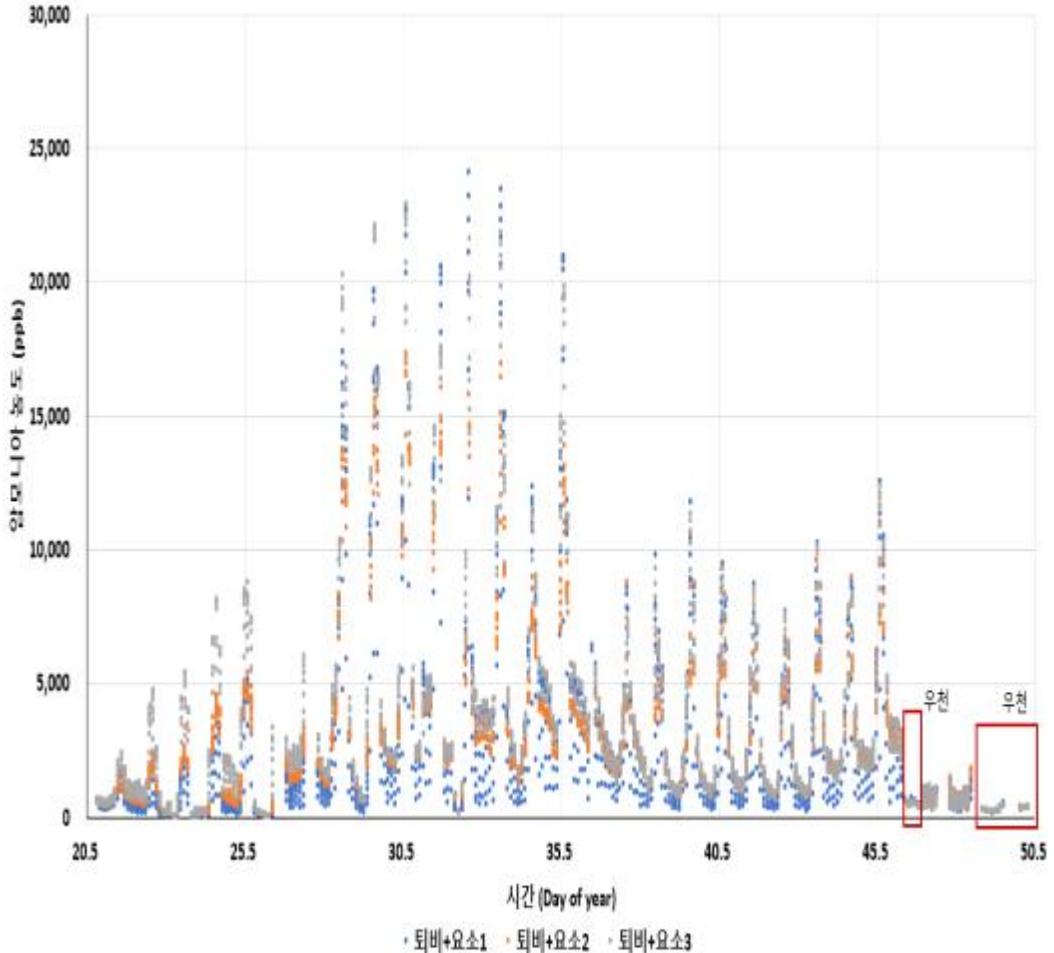
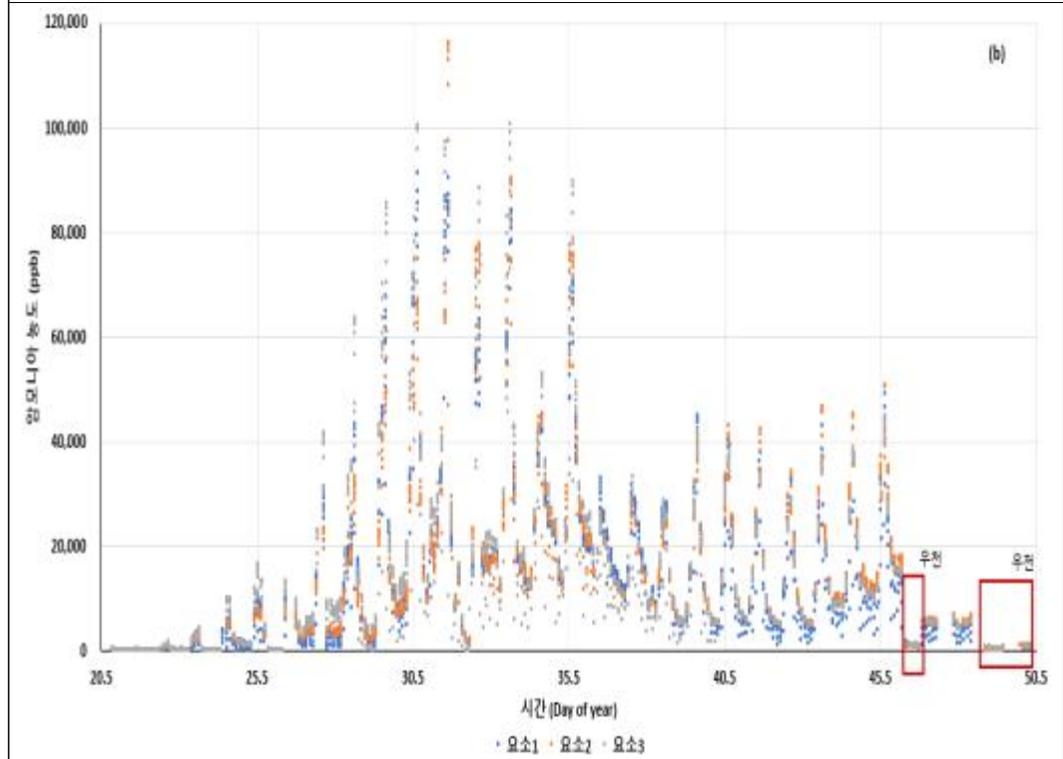
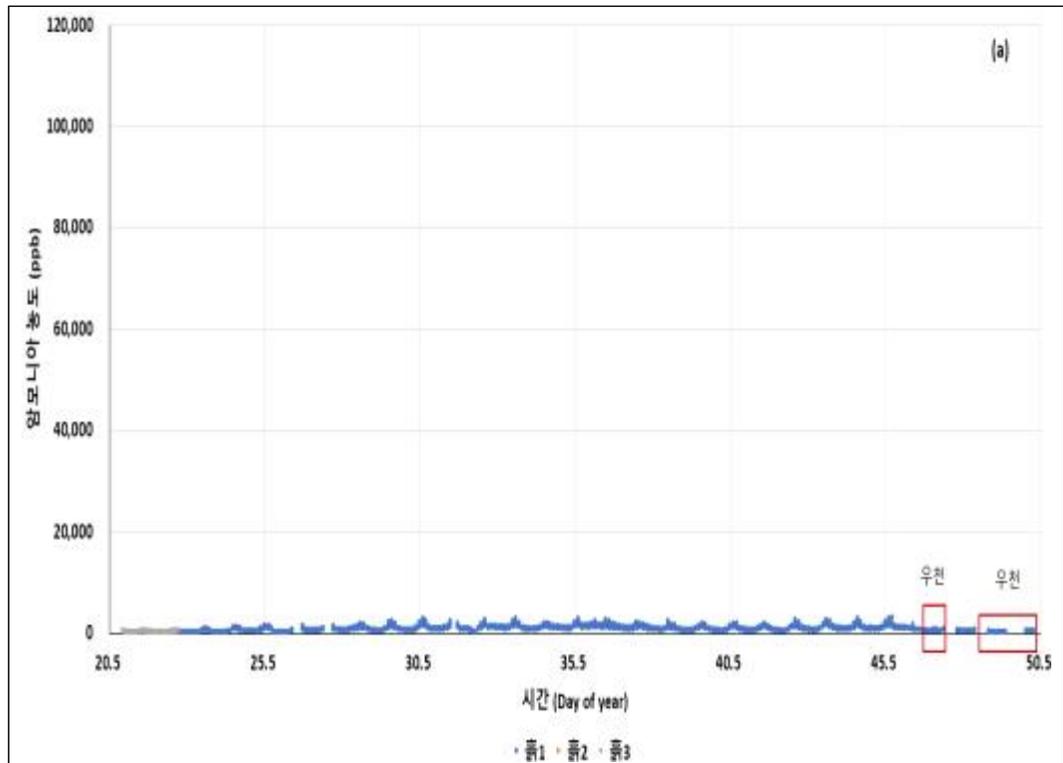


그림 2-22. 퇴비+요소 처리구의 암모니아 농도 변화

- 퇴비+요소 처리구의 농도는 43 ~ 24,119ppb 사이의 범위로 측정이 되었으며, 0일차부터 평균 암모니아 농도가 647ppb 수준으로 대조구(흙) 및 요소 처리구에 비해 1.7배 수준으로 높았으며, 1일차부터 농도가 2,000 ppb 이상으로 증가하여 3일 이후에는 5,000ppb 이상의 농도가 측정되는 것을 확인할 수 있었음
- 실제 농경지 토양에 퇴비와 요소를 함께 처리하는 경우, 퇴비 및 요소

단독 시비 경우보다 암모니아 배출량이 더 큰 것을 확인할 수 있었으며, 3일차 이후에는 기온이 -10℃로 떨어지면서 농도가 3,000ppb 밑으로 떨어지는 것을 확인할 수 있었음

- 3일 차 이후에는 5,404ppb의 암모니아 농도가 발생하면서 요소 처리구인 4,484ppb의 농도와 1.2배 정도 수준밖에 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있었음
- 초기에 빠르게 효소 작용으로 인하여 암모니아 가스의 발생이 많이 일어나는 것으로 보였으나 이후로는 요소 처리구의 경우 퇴비+요소 처리구에 비해서 2~4.48배 이상의 암모니아 가스가 발생하는 것으로 나타남
- 위 실험 방법에서 설명하였지만, 요소처리구의 경우 40kg N 기준을 맞추기 위해서 140g의 요소비료를 사용하였고, 퇴비+요소 처리구의 경우 40kg N를 맞추기 위해서 요소비료 70g과 퇴비 2.27kg을 사용하였음
- 이러한 차이가 암모니아 가스 발생량에 영향을 미쳤을 것으로 판단됨



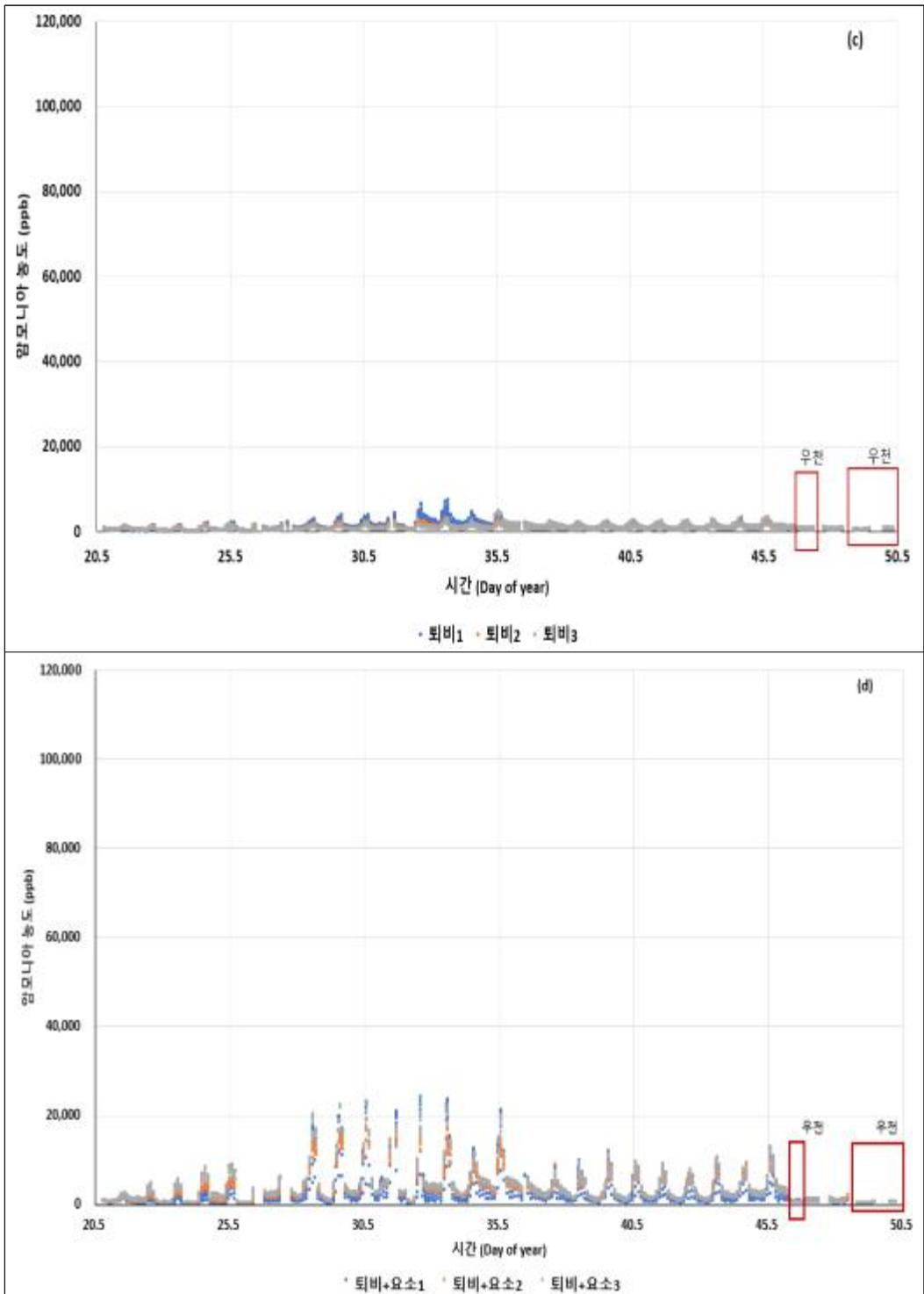


그림 2-23. 처리구별 암모니아 농도 변화

- y축의 암모니아 농도 (단위 : ppb)를 통일하였을 경우 요소를 처리한 경우와 퇴비와 요소를 함께 처리한 경우가 확연하게 차이가 나는 것을 직관적으로 확인할 수 있음

5. 퇴비와 요소 처리구에 요소분해효소 억제제(NBPT) 처리 시 암모니아 발생 경향

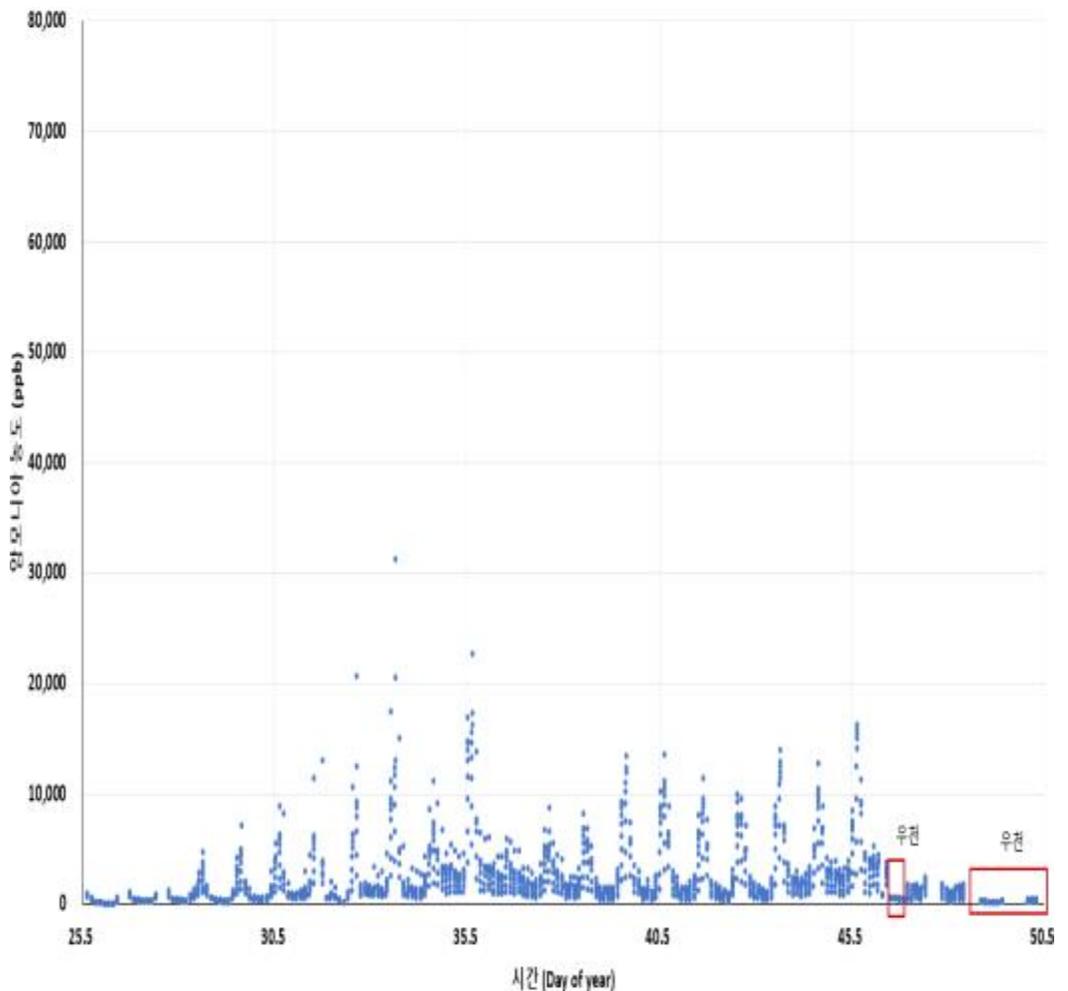


그림 2-24. 퇴비+요소+요소분해효소억제제 처리구의 암모니아 농도 변화

- 퇴비+요소분해효소 억제제 처리구의 농도는 63 ~ 31,315ppb 사이의 범위로 측정이 되었으며 기존 퇴비+요소 처리구에 요소분해효소 억제제를 직접 처리를 하였음
- 1일차의 평균 암모니아 농도가 218ppb 수준으로 퇴비+요소를 처리했음에도 불구하고 대조구(흙)와 유사하게 암모니아 농도가 배출되는 것을 확인할 수 있었음
- 처리 후 3일 이전의 낮시간에는 전반적으로 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었으나, 그 수준도 퇴비 처리구, 요소 처리구, 퇴비+요소 처리구에 비해서 각각 50%, 53%, 75% 수준으로 낮추는데 기여하는 것으로 확인할 수 있었음
- 퇴비+요소+바이오차 처리구에 비해서 70% 정도 더 낮은 암모니아 농도 배출을 확인할 수 있었음

6. 퇴비와 요소 처리구에 바이오차 처리 시 암모니아 발생 경향

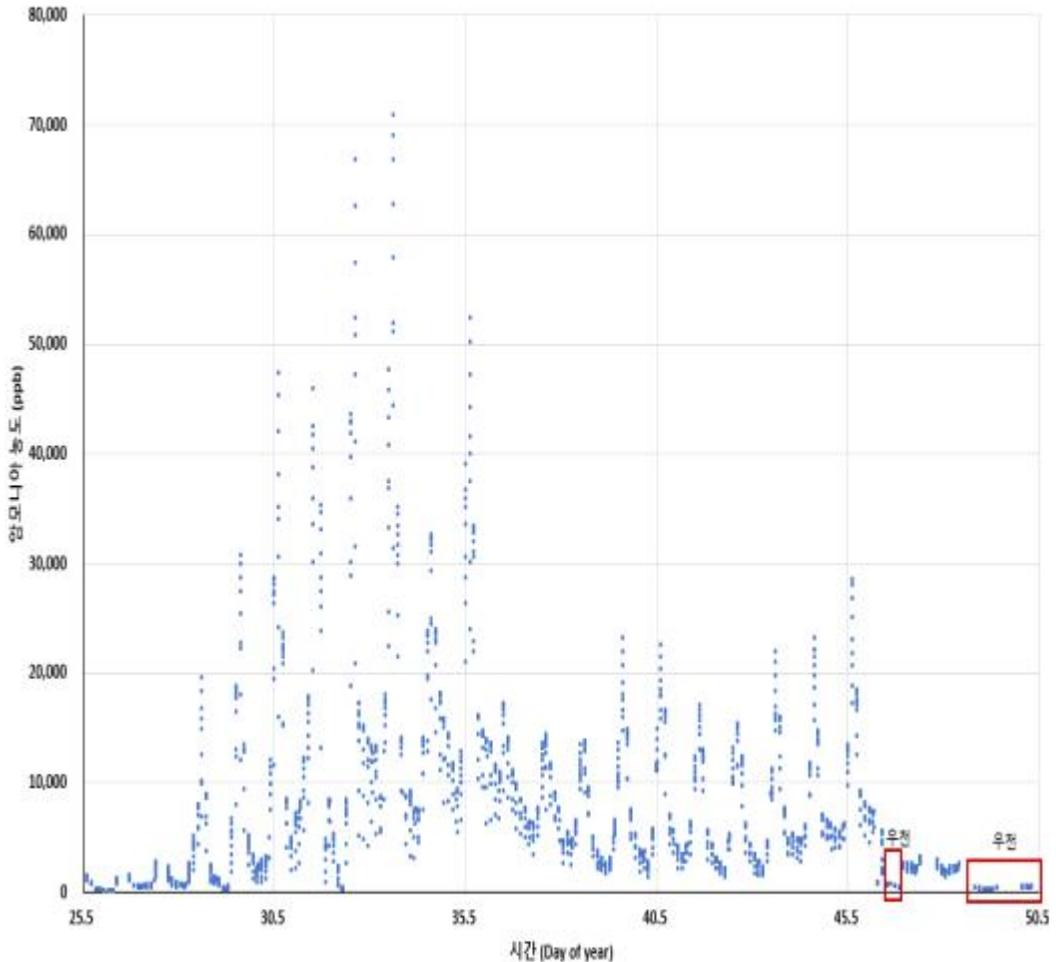
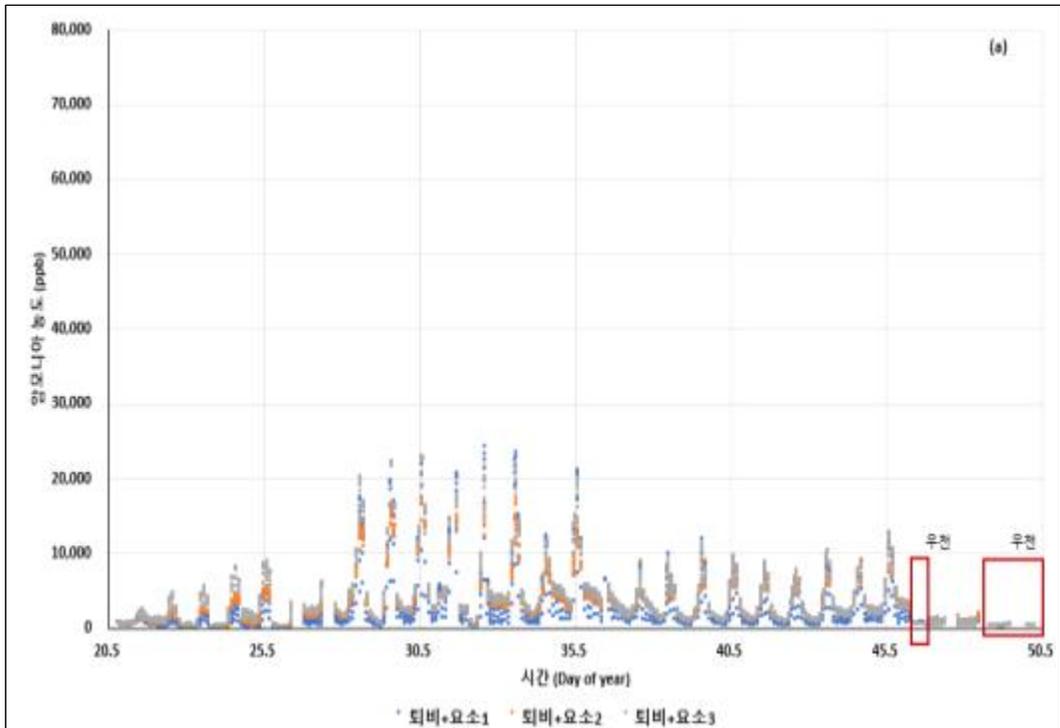


그림 2-25. 퇴비+요소+바이오차 처리구의 암모니아 농도 변화

- 퇴비+요소+바이오차 처리구는 평균 8,283.58 ppb의 암모니아 농도가 측정되었으며, 퇴비+요소+요소분해효소억제제 처리구의 농도에 비해서 3.34배 더 높은 수준으로 유의적인 차이가 있을만큼 더 많은 암모니아가 발생하였음
- 위의 실험을 바탕으로, 요소분해효소억제제인 요소분해효소억제제가 퇴비+요소비료를 시비하는 상황에서 발생하는 암모니아의 농도를 22%

수준으로 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있었음

- 바이오차의 경우 초기 5일 정도까지는 요소분해효소를 억제하는 효과가 있는 것처럼 보였으나, 5일 이후로는 퇴비+요소 처리구보다 2~3배까지 더 많은 암모니아 가스를 발생시키는 것으로 확인할 수 있었으며 15일 이후로도 퇴비+요소보다 암모니아 가스 발생량이 더 높았음
- 아래의 그래프 퇴비+요소 (a), 퇴비+요소+NBPT (b), 퇴비+요소+바이오차 (c)의 비교를 통하여 y축을 통일하였을 때 (b) 퇴비+요소+NBPT의 처리구가 (a)와 (c) 처리구에 비해서 암모니아 발생량의 경향이 낮다는 것을 확인할 수 있음
- 바이오차를 처리한 (c)에서 다른 처리구보다 약 2 ~ 4배까지 더 많은 양의 암모니아가 발생한다는 것을 확인할 수 있었으며, 바이오차의 효과가 요소분해효소의 억제를 하지 못하고, 오히려 암모니아를 더 많이 발생시킨다는 점에서 추가적인 연구가 더 필요해 보임



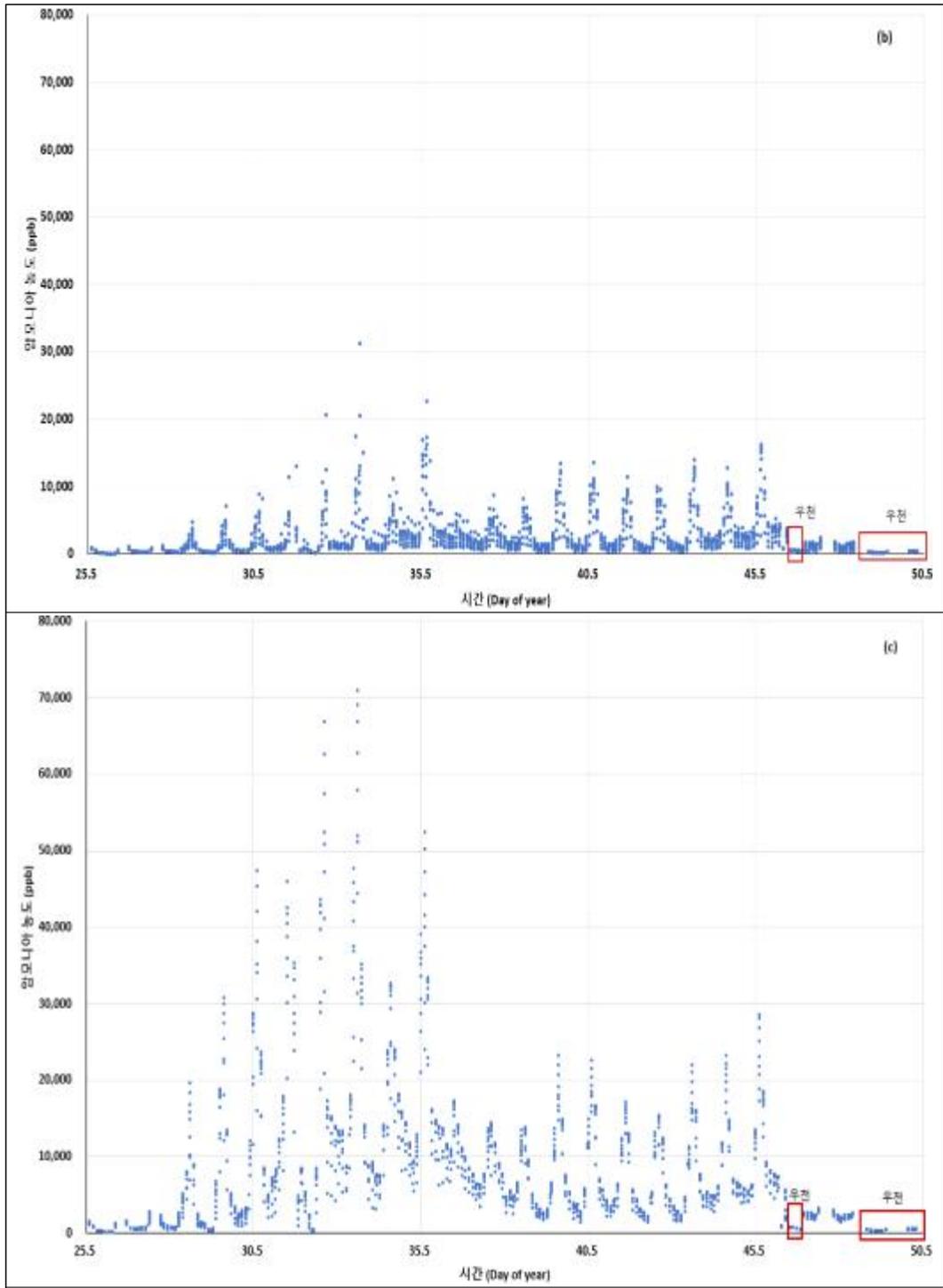


그림 2-26. 요소분해효소억제제 처리구별 암모니아 농도 변화 비교

- 퇴비+요소와 그에 따른 요소분해효소 억제제인 요소분해효소 억제제와 바이오차의 경우 암모니아 농도가 요소분해효소 억제제 처리한 경우 퇴비+요소 처리구에 비해서 22% 낮은 수준으로 암모니아가 발생하였음. 반면, 바이오차 처리구의 경우 퇴비+요소 처리구에 비해서 2.60배 더 많은 암모니아가 발생하였고, 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구의 농도에 비해서 3.34배 더 높은 수준으로 유의적인 차이가 있을 만큼 더 많은 암모니아가 발생하였음 ($p < 0.05$)
- 각각의 그래프를 y축을 통일하여 비교를 하였을 경우 퇴비+요소와 퇴비+요소+요소분해효소억제제의 처리구의 경우 암모니아 농도의 변화가 거의 비슷하나 퇴비+요소의 처리구가 약간 더 높은 것으로 보임
- 퇴비+요소+바이오차 처리구의 경우는 퇴비+요소 처리구와 퇴비+요소+요소분해효소억제제 처리구에 비해서 암모니아 배출량이 높은 것을 직관적으로 확인할 수 있음

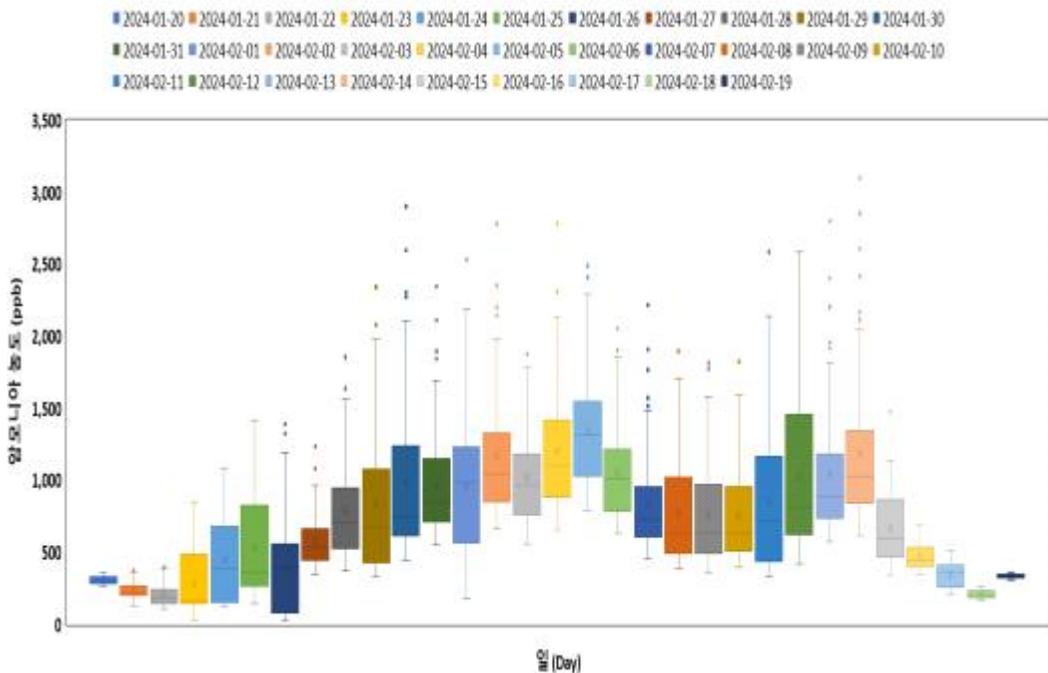


그림 2-27. 일자별 대조구(흙) 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림

- 대조구(흙) 처리구의 일자별 암모니아 가스 발생량의 모습을 위의 산점도보다 명확하게 보여주기 위한 그림으로 각 범위를 1/4씩 잘라서 데이터의 통계량을 보여주는 효과가 있음
- 각 날짜별 최고 발생량과 최저 발생량을 확인할 수 있으며 발생량의 변화 경향까지 확인할 수 있음
- 대조구(흙)의 경우 대체로 500~1500ppb 사이의 암모니아 가스가 발생하고 있으며 25일 이후에 우천 이후로 초기 수준의 암모니아 발생량으로 값이 떨어지는 것을 확인할 수 있음

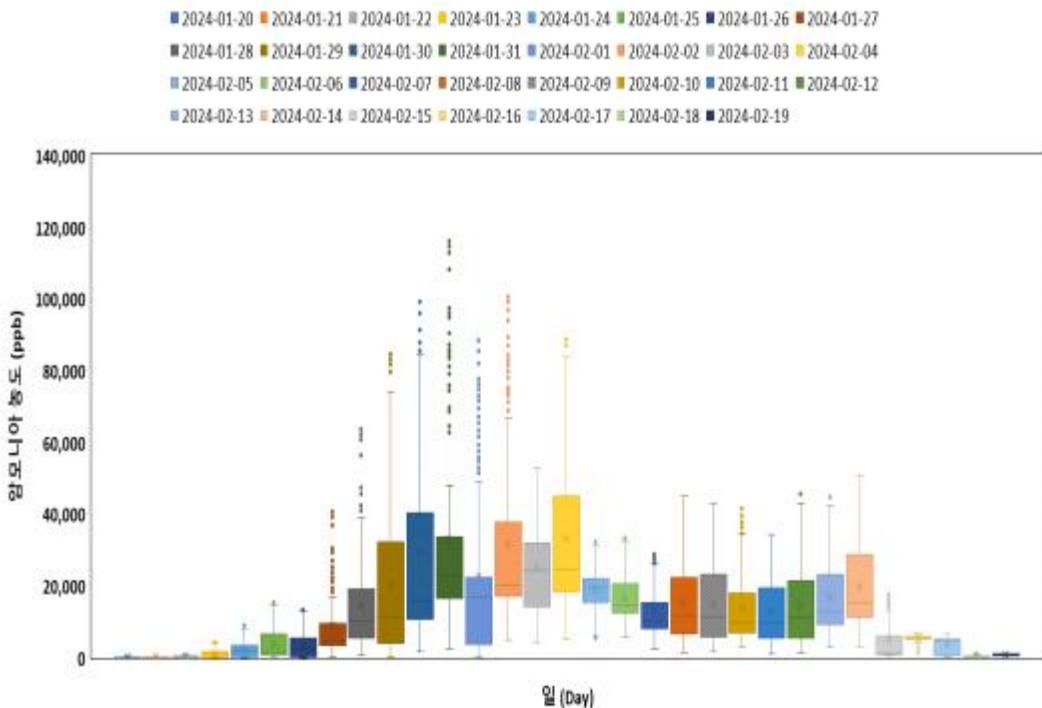


그림 2-28. 일자별 요소 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림

- 요소 처리구의 일자별 암모니아 가스 발생량의 모습을 위의 산점도보다 명확하게 보여주기 위한 그림으로 각 범위를 1/4씩 잘라서 데이터의 통계량을 보여주는 효과가 있음

- 각 날짜별 최고 발생량과 최저 발생량을 확인할 수 있으며 발생량의 변화 경향까지 확인할 수 있음
- 요소의 경우 대체로 5,000~40,000ppb 사이의 암모니아 가스가 발생하고 있으며 25일 이후에 우천 이후로 5,000ppb 수준의 암모니아 발생량으로 값이 3.5배 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있음

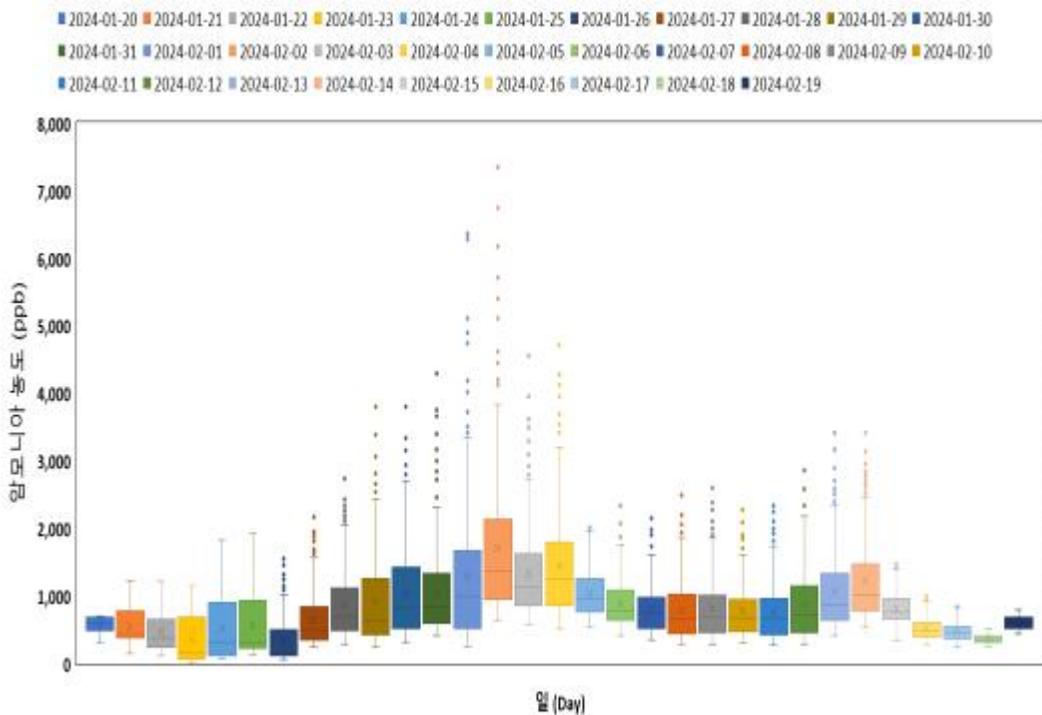


그림 2-29. 일자별 퇴비 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림

- 퇴비 처리구의 일자별 암모니아 가스 발생량의 모습을 위의 산점도보다 명확하게 보여주기 위한 그림으로 각 범위를 1/4씩 잘라서 데이터의 통계량을 보여주는 효과가 있음
- 각 날짜별 최고 발생량과 최저 발생량을 확인할 수 있으며 발생량의 변화 경향까지 확인할 수 있음
- 퇴비의 경우 대체로 500~1,500ppb 사이의 암모니아 가스가 발생하고

있으며 25일 이후에 우천 이후로 초기 500ppb 수준으로 암모니아가 발생하는 것을 확인할 수 있음

- 대조구(흙) 처리구와 크게 차이가 나지 않으며 통계분석 결과로도 유의적 차이가 나지 않음 ($p>0.05$)

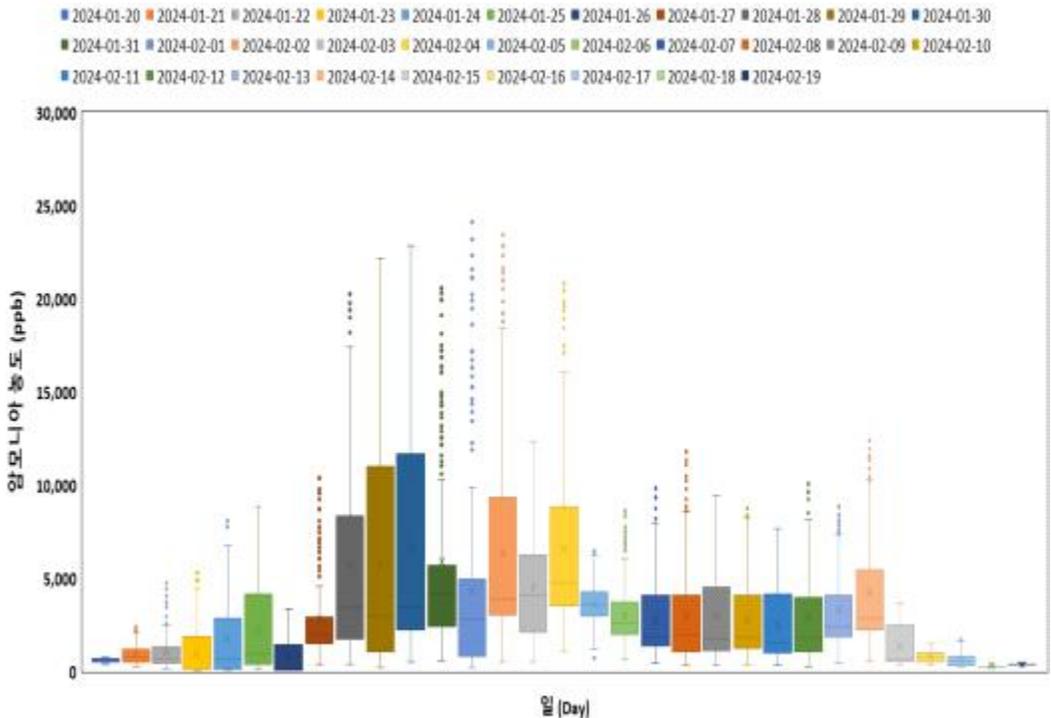


그림 2-30. 일자별 퇴비+요소 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림

- 퇴비+요소 처리구의 일자별 암모니아 가스 발생량의 모습을 위의 산점도보다 명확하게 보여주기 위한 그림으로 각 범위를 1/4씩 잘라서 데이터의 통계량을 보여주는 효과가 있음
- 각 날짜별 최고 발생량과 최저 발생량을 확인할 수 있으며 발생량의 변화 경향까지 확인할 수 있음
- 퇴비+요소의 경우 대체로 3,000~10,000ppb 사이의 암모니아 가스가 발생하고 있으며 25일 이후에 우천 이후로 5,000ppb 이하로 암모니아

발생량이 줄어드는 것을 확인할 수 있음

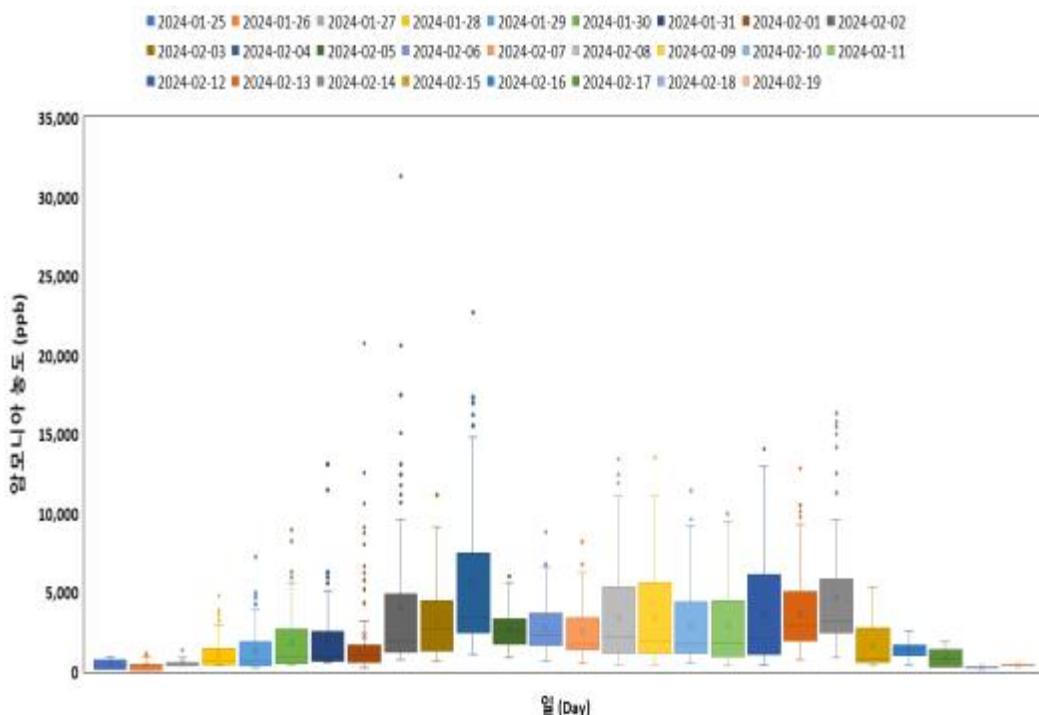


그림 2-31. 일자별 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림

- 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구의 일자별 암모니아 가스 발생량의 모습을 위의 산점도보다 명확하게 보여주기 위한 그림으로 각 범위를 1/4씩 잘라서 데이터의 통계량을 보여주는 효과가 있음
- 각 날짜별 최고 발생량과 최저 발생량을 확인할 수 있으며 발생량의 변화 경향까지 확인할 수 있음
- 퇴비+요소+요소분해효소 억제제의 경우 대체로 3,000~7,500ppb 사이의 암모니아 가스가 발생하고 있으며 25일 이후에 우천 이후로 2,500ppb 이하로 암모니아 발생량이 떨어지는 것을 확인할 수 있음

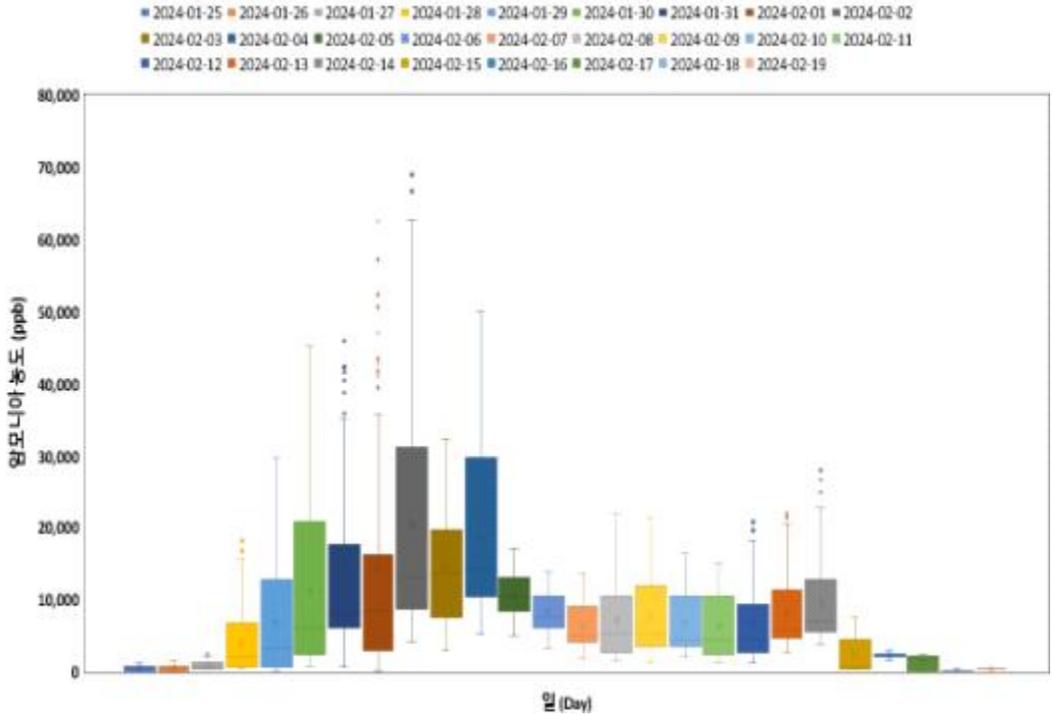
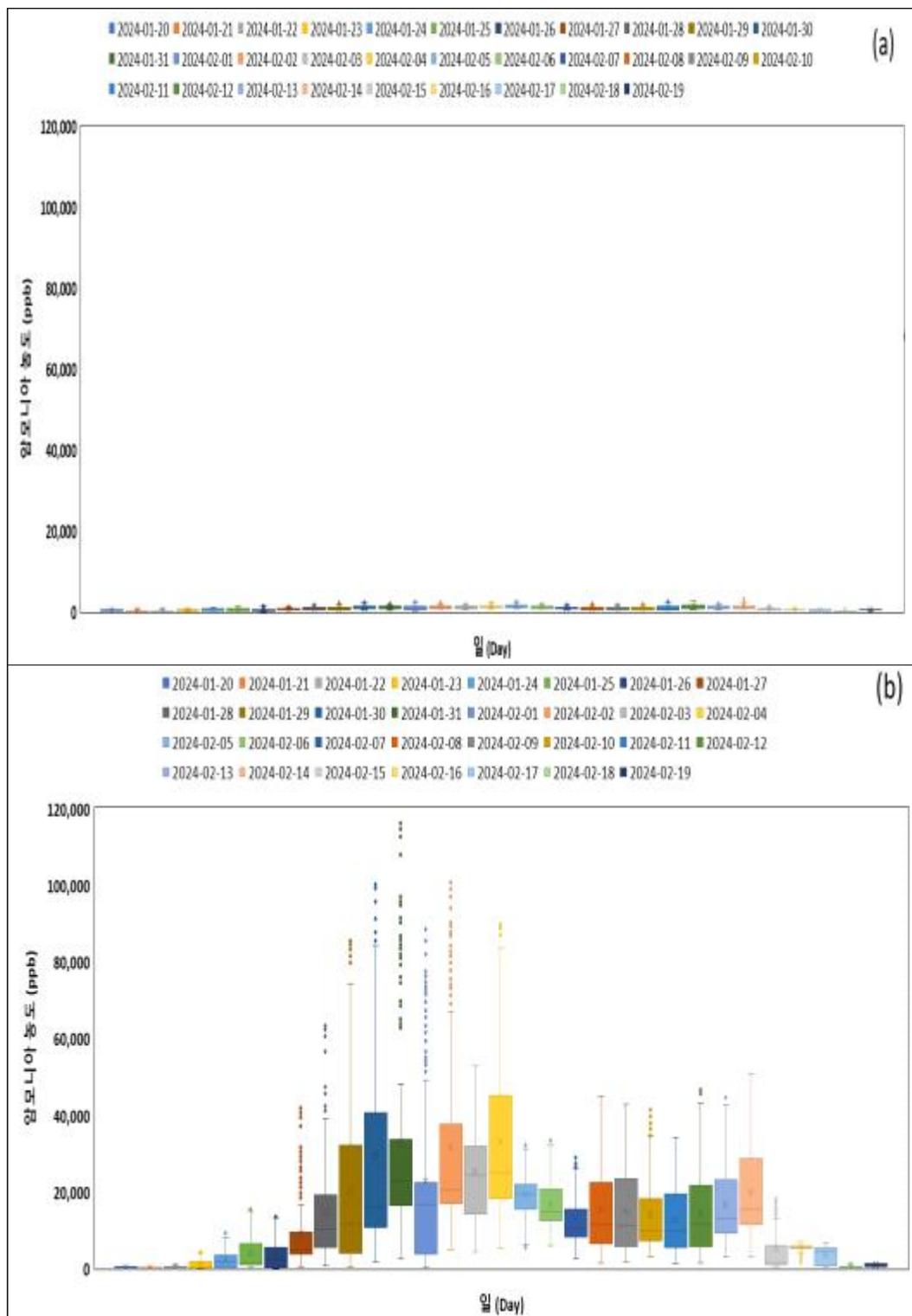
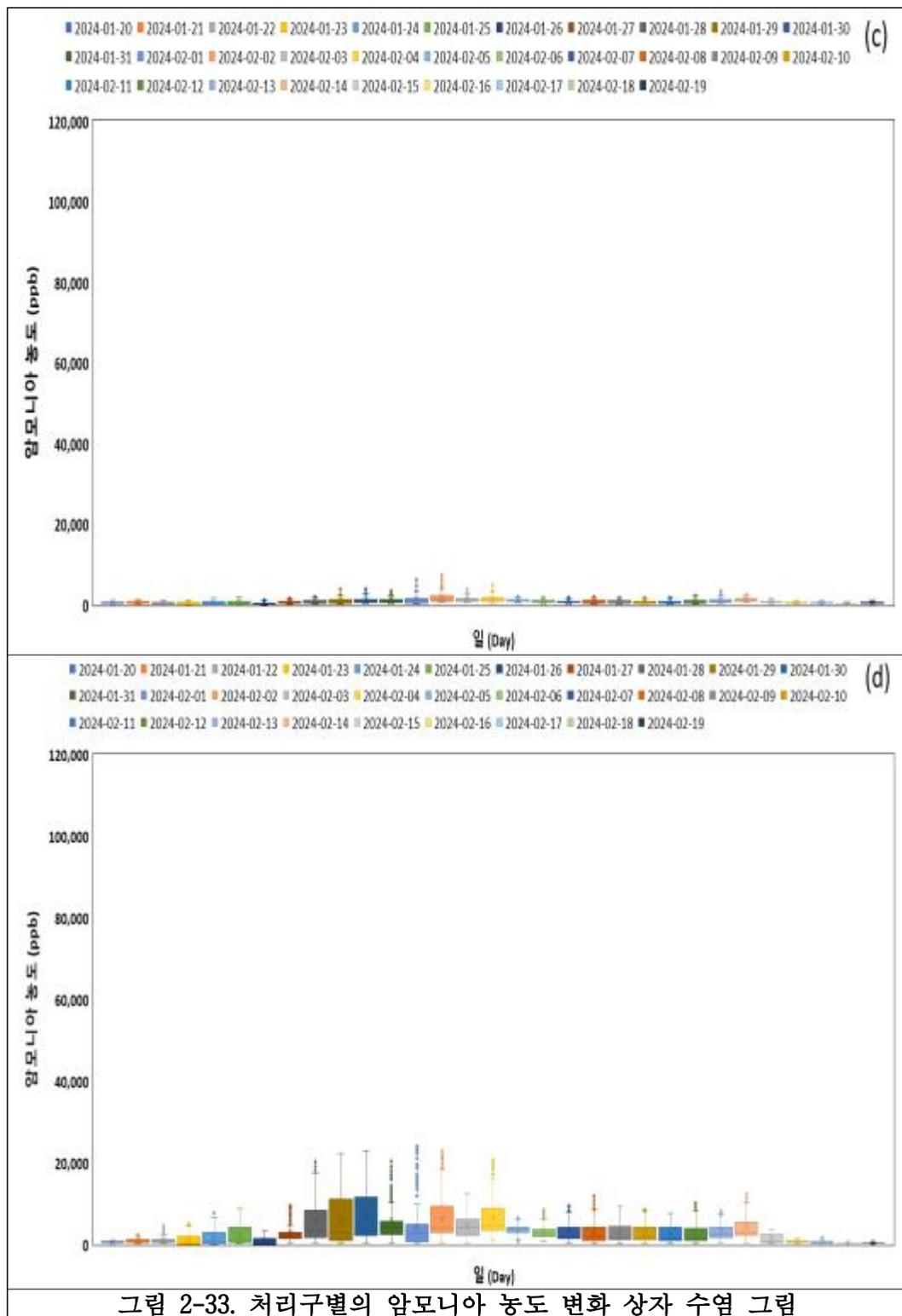


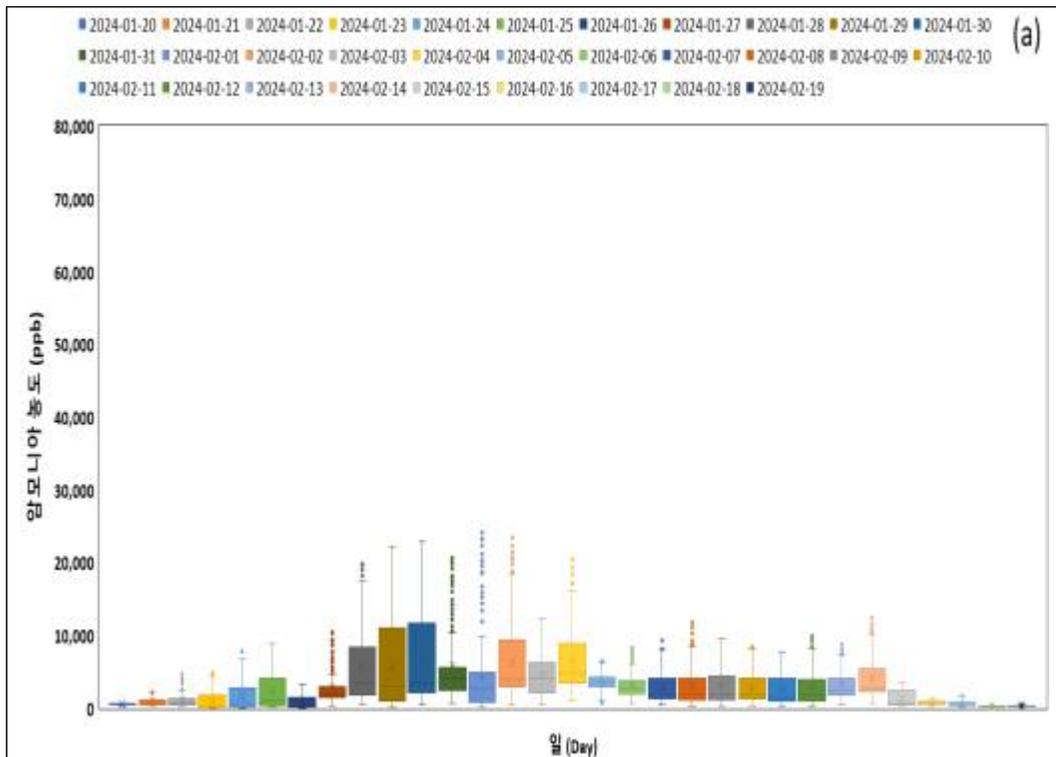
그림 2-32. 일자별 퇴비+요소+바이오차 처리구의 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림

- 퇴비+요소+바이오차의 경우 대체로 2,000~10,000ppb 사이의 암모니아 가스가 발생하고 있으며 25일 이후에 우천 이후 2,500ppb 이하로 암모니아 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있음
- 상자 수염 그림 또한 (a) 대조구(흙), (b) 요소, (c) 퇴비, (d) 퇴비+요소를 비교하기 용이하도록 y축을 통일 하였음





- 위의 그림 2-33은 처리구별 상자 수염 그림의 y축을 가장 암모니아 농도가 높은 요소처리구를 기준으로 하였을 때 그래프를 비교한 결과임
- 대조구(흙)과 퇴비 처리구의 경우 암모니아 농도가 20,000ppb 이하로 측정이 되었기 때문에 유사한 형태의 그림을 볼 수 있으며, 요소와 퇴비+요소 처리구의 경우에도 퇴비+요소의 경우 40,000ppb 이상으로 암모니아가 가스가 발생되지 않았기에 요소 처리구에 비해서 암모니아 농도가 다소 낮게 측정되는 것으로 볼 수 있음



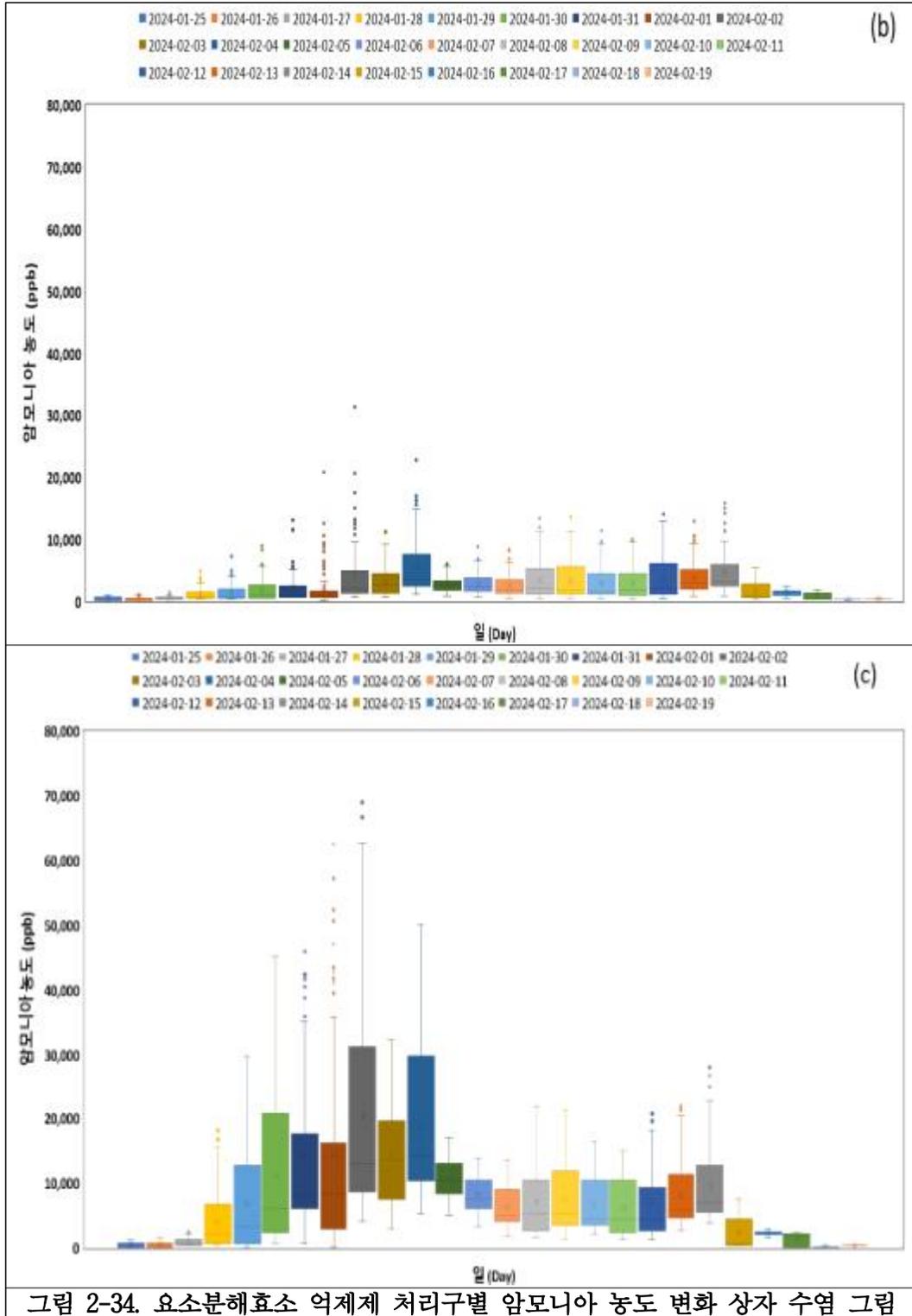


그림 2-34. 요소분해효소 억제제 처리구별 암모니아 농도 변화 상자 수염 그림

- 위의 그림 2-34은 요소분해효소 억제제를 처리한 (a) 퇴비+요소 (b) 퇴비+요소+요소분해효소 억제제(NBPT), (c) 퇴비+요소+바이오차 처리구별 상자 수염 그림의 y축을 가장 암모니아 농도가 높은 값을 기준으로 하였을 때 그래프를 비교한 결과임
- 대조구(흙)과 퇴비 처리구의 경우 암모니아 농도가 20,000ppb 이하로 측정이 되었기 때문에 유사한 형태의 그림을 볼 수 있으며, 요소와 퇴비+요소 처리구의 경우에도 퇴비+요소의 경우 40,000ppb 이상으로 암모니아가 가스가 발생되지 않았기에 요소 처리구에 비해서 암모니아 농도가 다소 낮게 측정되는 것으로 볼 수 있음

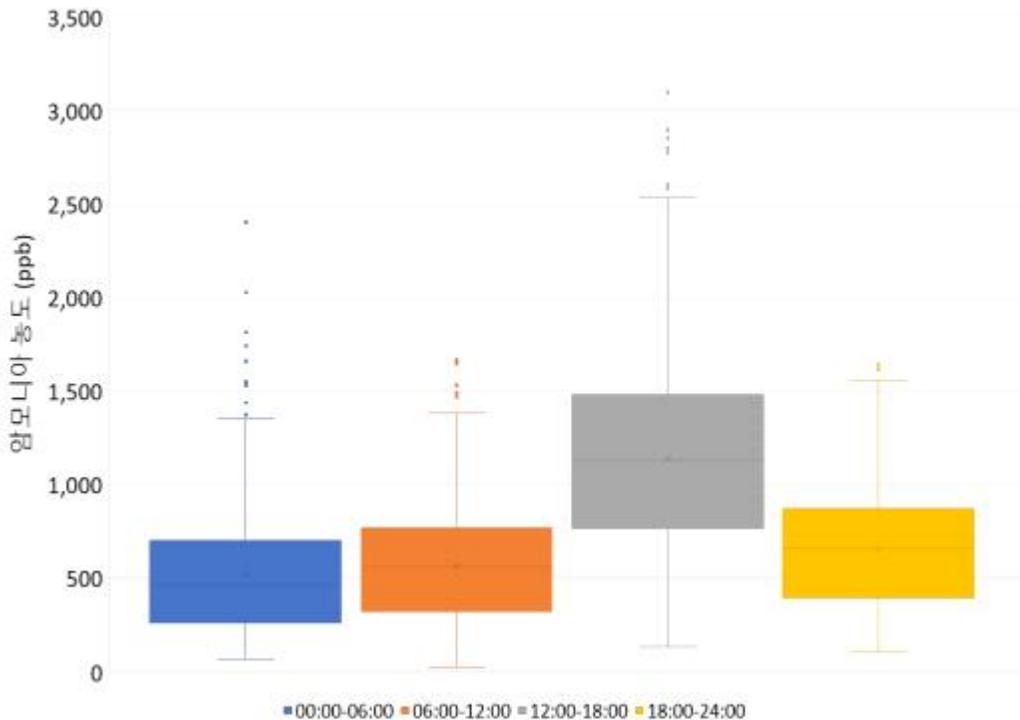


그림 2-35. 대조구(흙) 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화

- 대조구(흙) 처리구의 경우 12:00~18:00에 햇빛이 들고 온도가 높아지고 효소 작용이 활발해지면서 암모니아 배출량이 증가하는 것으로

확인되었음

- 그 이외의 시간대는 1,000ppb 이하 수준으로 암모니아 가스가 발생하였음

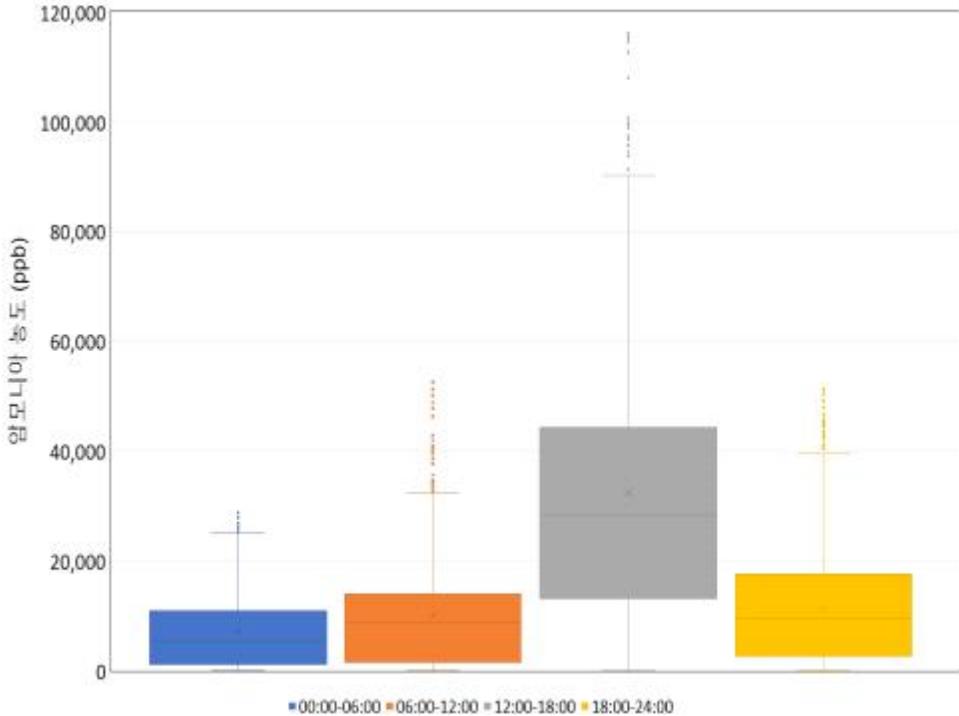


그림 2-36. 요소 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화

- 요소 처리구의 경우 대조구와 마찬가지로 12:00~18:00에 햇빛이 들고 온도가 높아지고 효소 작용이 활발해지면서 암모니아 배출량이 증가하는 것으로 확인되었음
- 그 이외의 시간대는 20,000ppb 이하 수준으로 암모니아 가스가 발생하였음
- 새벽과 저녁 그리고 오전 시간에는 환경부의 암모니아 배출허용 농도인 12~30ppm 사이의 범위에 해당되지만, 오후 시간대인 12:00~18:00까지는 허용농도를 초과하기 때문에 농도를 줄일 수 있는 대책이 필요함

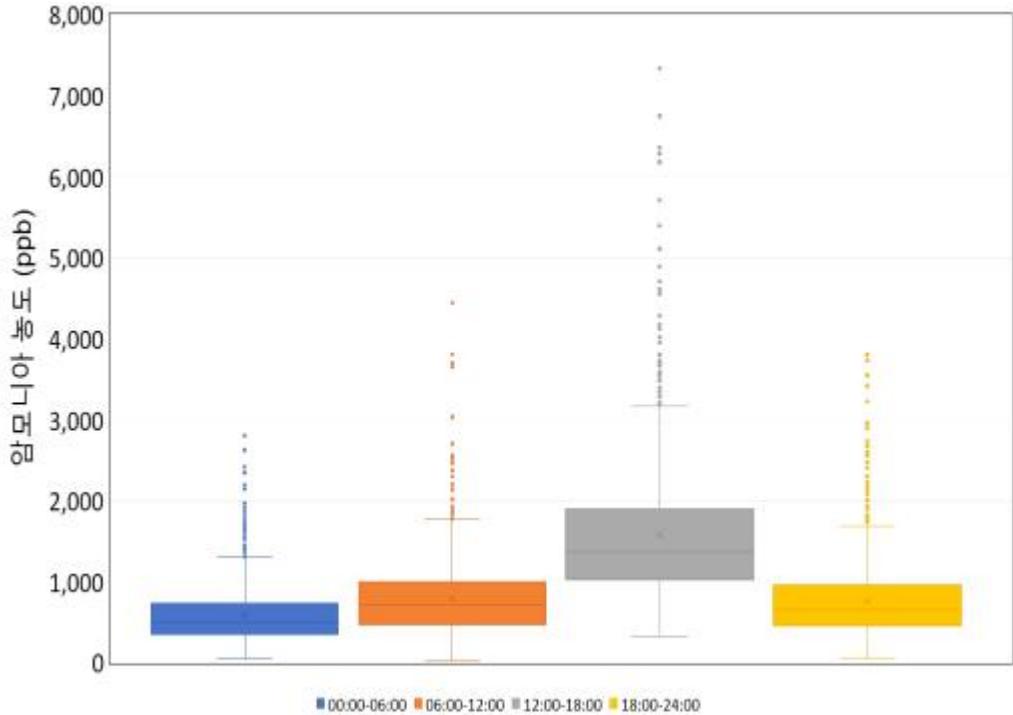


그림 2-37. 퇴비 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화

- 퇴비 처리구의 경우 대조구와 마찬가지로 12:00~18:00에 햇빛이 들고, 온도가 높아져 효소 작용이 활발해지면서 암모니아 배출량이 증가하는 것으로 확인되었음
- 그 이외의 시간대는 1,000ppb 이하 수준으로 암모니아 가스가 발생하였음

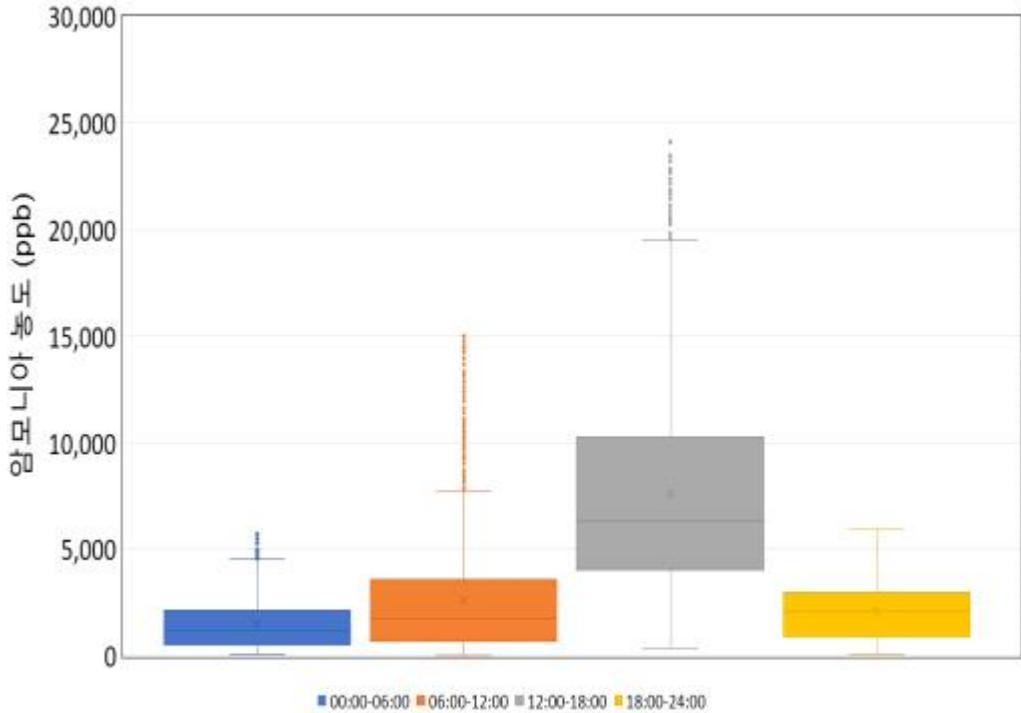


그림 2-38. 퇴비+요소 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화

- 퇴비+요소 처리구의 경우 다른 처리구들과 마찬가지로 12:00~18:00시에 햇빛이 들고 온도가 높아지고, 효소 작용이 활발해지면서 암모니아 배출량이 증가하는 것으로 확인되었음
- 그 이외의 시간대는 5,000ppb 이하 수준으로 암모니아 가스가 발생하였음
- 환경부의 암모니아 배출허용 농도인 12~30ppm 사이의 범위에 해당되므로 오후 시간대인 12:00~18:00까지는 허용농도 기준을 넘어서진 않지만 비슷한 수준으로 배출이 되기 때문에 농도를 줄일 수 있는 대책이 필요함

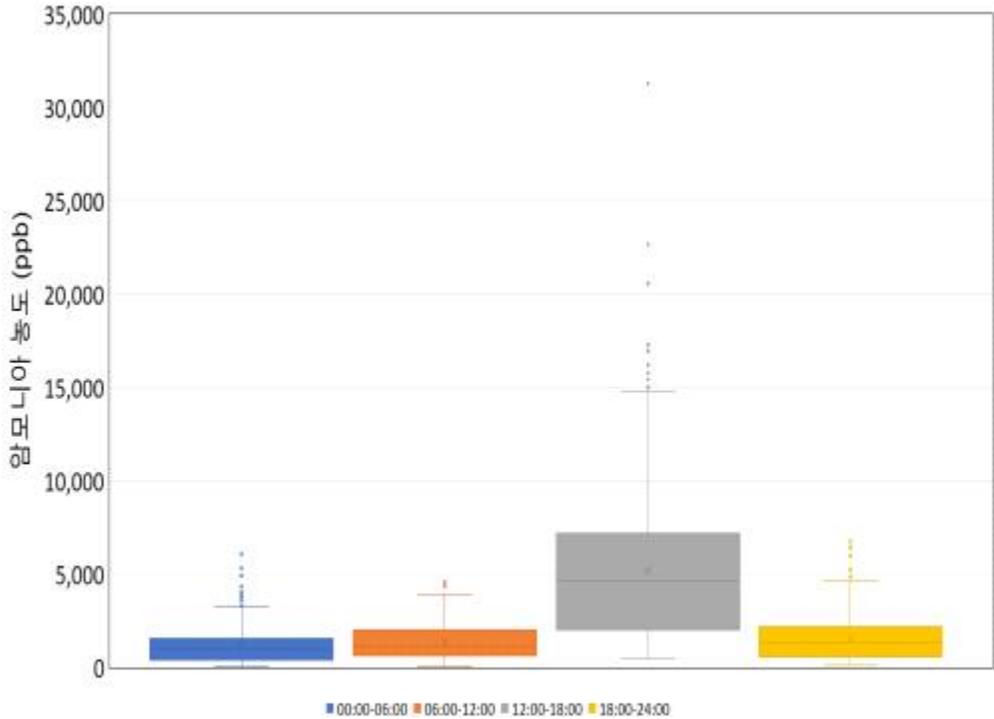


그림 2-39. 퇴비+요소+요소분해효소억제제(NBPT) 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화

- 퇴비+요소+요소분해효소억제제 처리구의 경우 다른 처리구와 마찬가지로 12:00~18:00시에 햇빛이 들고 온도가 높아지고 효소 작용이 활발해지면서 암모니아 배출량이 증가하는 것으로 확인되었음
- 그 이외의 시간대는 3,000ppb 이하 수준으로 암모니아 가스가 발생하였음
- 퇴비+요소 처리구의 경우 환경부의 암모니아 배출 허용농도인 12~30ppm 사이의 범위에서 암모니아 발생량이 측정되었다면, 요소분해효소억제제를 처리한 경우에는 31.6% 낮은 수준의 암모니아 발생량이 측정되었음

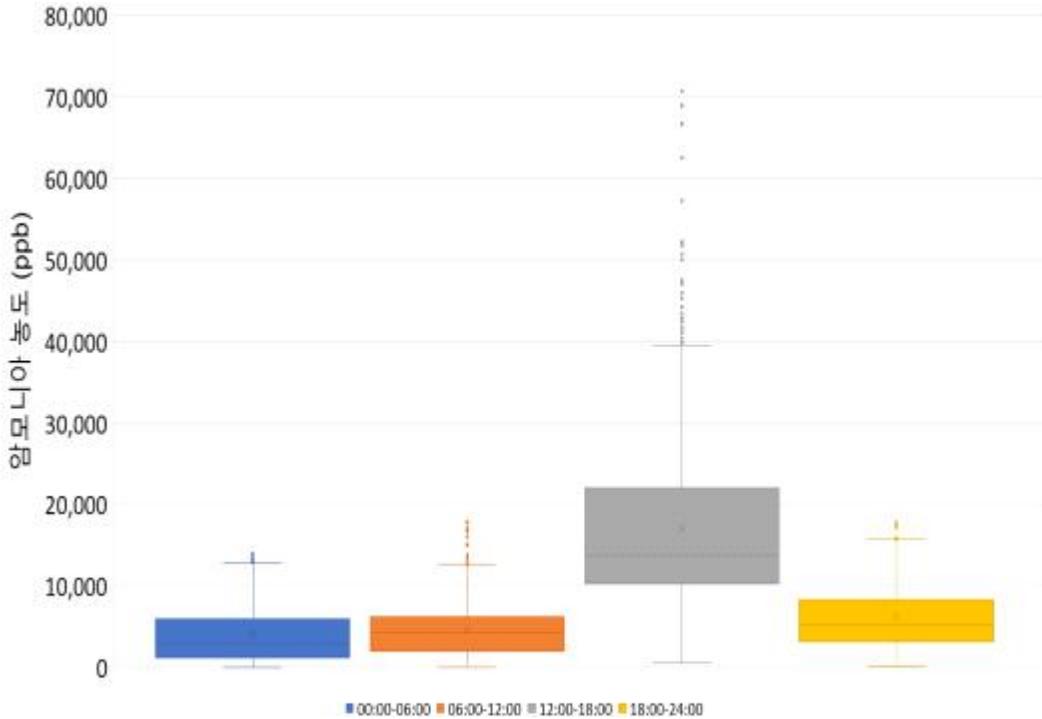


그림 2-40. 퇴비+요소+바이오차 처리구의 시간대별 암모니아 농도 변화

- 퇴비+요소+바이오차 처리구의 경우 다른 처리구와 마찬가지로 12:00~18:00시에 햇빛이 들고 온도가 높아지고 효소 작용이 활발해지면서 암모니아 배출량이 증가하는 것으로 확인되었음
- 그 이외의 시간대는 10,000ppb 이하 수준으로 암모니아 가스가 발생하였음
- 바이오차를 처리하는 처리구에서는 새벽과 저녁 시간에는 환경부의 암모니아 배출허용 농도인 12~30ppm 사이의 범위에 해당되지 않지만, 오후 시간대인 12:00~18:00까지는 허용농도 범위보다 높을 때도 있기 때문에 농도를 줄일 수 있는 대안책이 필요함

■ 시간에 따른 처리구별 암모니아 농도 평균

- 통계 분석 결과 요소처리구가 다른 처리구와 모두 유의적인 차이

($p < 0.05$)가 있었으며, Box plot을 확인한 결과 요소 처리구와 퇴비+요소, 퇴비+요소+바이오차 처리구의 농도 변동이 급격한 것으로 확인되었음

- 퇴비+요소 처리구의 암모니아 농도는 대조구(흙), 요소 처리구, 퇴비 처리구, 퇴비+요소분해효소억제제 처리구 및 퇴비+바이오차 처리구보다 유의적으로 높게 나타났음 ($p < 0.05$)
- 퇴비 처리구의 경우 대조구(흙) 처리구와 암모니아 농도에서 유의적인 차이가 나타나지 않았음 ($p > 0.05$)
- 퇴비 처리구의 암모니아 농도는 퇴비+요소분해효소억제제처리구 및 퇴비+바이오차 처리구보다 유의적으로 낮게 나타났음 ($p < 0.05$)
- 퇴비+요소 처리구는 퇴비+요소+요소분해효소억제제 처리구 및 퇴비+요소+바이오차 처리구의 암모니아 농도와 유의적인 차이가 각각 나타남 ($p < 0.05$)
- 처리구에 따라 시간별 암모니아 배출량의 변이가 큼

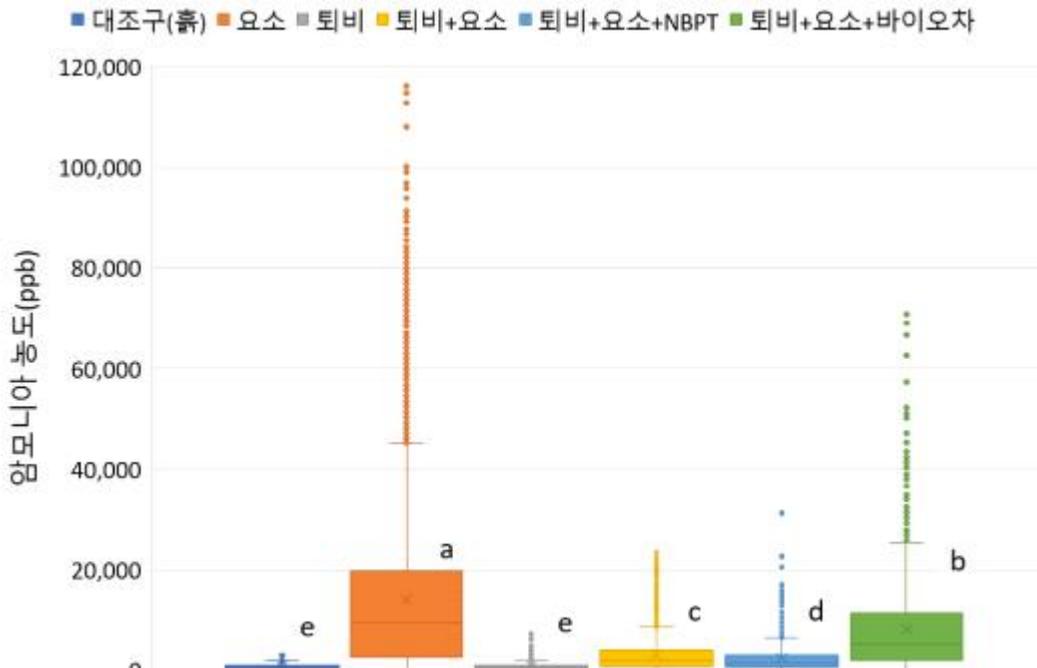


그림 2-41. 처리구별 암모니아 농도 Box plot

표 2-7. 각 처리구별 암모니아 농도의 유의성 분석

0.05 수준으로 유의적 분석을 하였으며 유의적 차이가 있는 경우는 *** 로 표시함				
처리구간 비교	Difference Between Means	Simultaneous 95% Confidence Limits		
2 - 6	5881.4	5222.4	6540.5	***
2 - 4	10987.9	10553.2	11422.6	***
2 - 5	11691.4	11031.1	12351.7	***
2 - 3	13311.6	12877.9	13745.2	***
2 - 1	13427.9	12826.6	14029.1	***
6 - 2	-5881.4	-6540.5	-5222.4	***
6 - 4	5106.5	4447.4	5765.5	***
6 - 5	5810	4984.5	6635.4	***
6 - 3	7430.1	6771.8	8088.5	***
6 - 1	7546.4	6767.4	8325.4	***
4 - 2	-10987.9	-11422.6	-10553.2	***
4 - 6	-5106.5	-5765.5	-4447.4	***
4 - 5	703.5	43.2	1363.8	***
4 - 3	2323.7	1890	2757.4	***
4 - 1	2440	1838.7	3041.2	***
5 - 2	-11691.4	-12351.7	-11031.1	***
5 - 6	-5810	-6635.4	-4984.5	***
5 - 4	-703.5	-1363.8	-43.2	***
5 - 3	1620.2	960.6	2279.8	***
5 - 1	1736.4	956.4	2516.5	***
3 - 2	-13311.6	-13745.2	-12877.9	***
3 - 6	-7430.1	-8088.5	-6771.8	***
3 - 4	-2323.7	-2757.4	-1890	***
3 - 5	-1620.2	-2279.8	-960.6	***
3 - 1	116.3	-484.2	716.7	
1 - 2	-13427.9	-14029.1	-12826.6	***
1 - 6	-7546.4	-8325.4	-6767.4	***
1 - 4	-2440	-3041.2	-1838.7	***
1 - 5	-1736.4	-2516.5	-956.4	***
1 - 3	-116.3	-716.7	484.2	

처리구 : 1 = 대조구(흙) / 2 = 요소 / 3 = 퇴비 /

4 = 퇴비+요소 / 5 = 퇴비+요소+요소분해효소억제제 / 6 =
퇴비+요소+바이오차

제3절. 종합결론

- 실험 1 (포트실험)에서의 각 처리구별 암모니아 농도 비교
 - 포트실험에서 퇴비+요소 처리구(501ppb)가 퇴비 처리구 (33ppb)에 비해 15배 많은 암모니아 농도가 관측 되었음
 - 퇴비, 퇴비+요소에 요소분해효소억제제를 처리한 경우 처리하지 않은 경우에 비해서 각각 0.01%, 79% 저감되는 것을 확인할 수 있었음
 - 반면, 요소에 요소분해효소억제제를 첨가한 처리구 (20kg / 40kg)의 경우, 요소분해효소억제제를 첨가하였음에도 암모니아 농도가 50.2ppb / 137.0ppb가 측정되었으며, 기존 요소 처리구 (20kg / 40kg)의 암모니아 농도 39.1ppb / 46.9ppb 보다 높게 측정되었음
 - 질소 시용 농도가 높아질수록 요소분해효소억제제의 효과는 퇴비+요소의 경우 최대 85%까지 저감되는 것을 확인할 수 있었고, 바이오차의 경우 암모니아 저감 효과가 75%까지 저감되는 것으로 평가됨

- 실험 2 (경작지 외부 현장 실험)에서의 각 처리구별 암모니아 농도 비교
 - 실험 결과 초기 5일까지는 요소 처리구 및 퇴비+요소 처리구에서 5,000ppb 이상의 암모니아 농도가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 퇴비 처리구에서는 최고 농도가 1,200ppb으로 1/3 수준으로 배출 된다는 것을 확인할 수 있었음
 - 요소 처리구에서 가장 높은 112,000ppb 이상의 암모니아 농도가 측정되었으며, 시간이 지난 후에도 가장 높은 암모니아의 배출 경향을 보였음.
 - 퇴비 처리구는 최대 7,000ppb 이상의 농도가 측정되었으나 15일

이후부터는 대조구(흙)과 유사하게 암모니아가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 암모니아 발생량이 대조구(흙)과 유의적 차이가 없음($p < 0.05$)

- 퇴비+요소+요소분해효소억제제 처리구와 퇴비+요소+바이오차 처리구는 처음 3일간은 대조구(흙)과 비슷한 100~300ppb 범위로 암모니아 농도가 측정되었으며, 동일한 양의 퇴비+요소를 시비한 처리구보다 낮게 측정되었으나, 3일 이후부터는 퇴비+요소+요소분해효소억제제의 경우 퇴비+요소 처리구와 비슷하지만 다소 낮게 암모니아가 발생하였음
- 퇴비+요소+바이오차의 경우 퇴비+요소 처리구보다 2.60배 더 많은 양의 암모니아 가스가 발생했으며, 퇴비+요소+요소분해효소억제제 처리구보다 3.34배 더 많은 양의 암모니아 가스가 발생하였으며 유의적 차이가 있음($p < 0.05$)
- 퇴비+요소 꾸준히 농도가 증가하다가 15일 이후부터 효소의 요소분해효소 활성 정도가 떨어지면서 농도가 13,000ppb 이하 범위로 떨어지는 것을 확인할 수 있었음.
- 시간대별 암모니아 농도 변화의 경우 12:00~18:00 사이에서 암모니아가 가장 많이 발생하였으며, 햇빛이 들어오고 온도가 따뜻해지면서 암모니아 발생량이 폭발적으로 증가한 것으로 파악됨
- 요소 처리구의 경우 환경부의 대기오염물질 배출허용기준인 12~30ppm을 3.5배 넘는 수준으로 암모니아가 배출되기 때문에 이를 저감시킬 수 있는 방법이 무조건적으로 필요함

제3장. 요약 및 결론

- 실험 1 (포트시험)과 실험 2 (경작지 외부 현장 실험)에서 무처리인 대조구(흙)의 암모니아 발생 농도가 요소 처리구, 퇴비 처리구 및 퇴비+요소 처리구보다 낮은 것을 확인하였음
 - 요소 또는 퇴비를 처리하지 않은 순수 토양에서는 암모니아 발생이 미비함

- 실험 2 (경작지 외부 현장 실험)에서 질소공급원 단일 처리인 요소 처리구에서 암모니아 농도의 평균은 14,234.63(\pm 16,141.75) ppb로 다른 어떠한 처리구보다 유의적 차이가 존재할 만큼 암모니아 농도 차이가 발생함($p < 0.05$)
 - 요소 처리구는 0~1일차에서는 200ppb 수준으로 대조구(흙)의 암모니아 농도와 비슷하지만, 3일 이후 16일까지 암모니아 농도가 50배 이상 증가하였다가 40,000ppb 수준으로 유지됨
 - 퇴비 처리구는 0일차부터 대조구(흙)와 요소 처리구보다 암모니아 농도가 높았으나, 3일차부터는 요소 처리구보다 암모니아 농도가 낮게 측정됨
 - 퇴비 처리구와 대조구(흙) 처리구의 암모니아 농도가 유의적 차이가 없었음 ($p > 0.05$)

- 실험 2 (경작지 외부 현장 실험)에서 퇴비+요소 처리구는 암모니아 농도 평균 값이 3,176.94 (\pm 3,583.11)ppb로 나타났으며, 시간 경과에 따른 암모니아 농도는 0일차부터 5일차까지는 효소가 활성이 되면서 요소 처리구보다 높게 암모니아가 측정되었음
 - 요소와 퇴비를 같이 시비할 경우, 시비 초기부터 단일처리 (요소 또는 퇴비) 보다 암모니아 발생량이 많았으나, 5일 이후부터는 요

소처리구보다 배출량이 낮게 측정되었음

- 통계 분석 결과 퇴비+요소 처리구의 암모니아 농도는 대조구(흙), 퇴비 처리구, 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구보다 유의적으로 높게 나타났음 ($p < 0.05$)
- 퇴비+요소 처리구의 경우 요소처리구와 퇴비+요소+바이오차 처리구보다 유의적으로 낮게 나타남($p < 0.05$)
- 요소 비료와 퇴비를 같이 시비할 경우, 퇴비에 있는 요소분해효소와 요소가 결합으로 효소+기질의 양이 증가하여 암모니아가 발생 속도가 증가하므로 단일 처리보다 짧은 시간 내에 암모니아 발생이 증가하여 토양 내 질소 함량이 감소하고, 작물의 질소 이용 효율을 저하 시킴
- 요소+요소분해효소 작용으로 인한 암모니아 발생은 토양 내 질소 함량을 감소시켜 추가적인 비료의 공급을 요구하며 이로 인해 경제적 손해 및 환경적 오염을 증대시킴

■ 실험 2 (경작지 외부 현장 실험)에서 퇴비와 요소 그리고 요소분해효소 억제제인 요소분해효소 억제제를 처리한 퇴비+요소+요소분해효소 억제제 처리구의 암모니아 농도는 2,473.61 ($\pm 1,145.79$) ppb로 퇴비+요소를 처리한 처리구보다 22% 낮은 수준의 암모니아가 발생함

- 요소분해효소억제제를 처리하면 퇴비 내의 요소분해효소 활성을 억제하여 암모니아의 발생을 감소시켜, 토양 내 질소를 다소 오랜 시간 보존할 수 있음
- 퇴비+요소+바이오차를 처리한 처리구의 경우 처음 3일정도는 퇴비+요소 처리구보다 56%의 암모니아 발생량 감축 효과가 있는 것처럼 보였으나, 3일 이후부터는 퇴비+요소 처리구보다 더 높은 암모니아가 발생하면서 무려 2.60배 더 많은 암모니아 가스가 발생하였음

- 실험결과를 종합하면 요소와 퇴비를 함께 시비하면 토양 내 암모니아 발생이 증가하며, 요소 비료의 과량 시비는 암모니아 발생을 촉진 시킴
 - 적절한 양의 요소와 퇴비를 혼합하여 이용하면, 과량의 요소를 투입하는 경우보다 암모니아 발생이 적고 퇴비에 의해 장기간에 걸쳐 토양에 질소를 공급할 수 있으며, 퇴비 내 유용한 미생물을 토양에 공급과 함께 경제적, 환경적 이점을 가질 수 있음
 - 요소 단일 사용은 암모니아 발생량이 퇴비 단일 사용과 유의차가 있었으며, 무려 18배 정도 더 많은 양의 암모니아 가스가 발생하였음.
 - 퇴비만 처리하였을 경우, 퇴비+요소 복합 시비보다 암모니아 발생량이 적어 퇴비(한우분)로 인한 냄새 발생 피해가 심각하다는 것에 반증하는 연구결과를 도출할 수 있었으며, 지나치게 많은 양의 퇴비+요소 복합 시비가 악취 민원의 원인이 될 수 있음을 확인할 수 있었음

- 요소분해효소 억제제 처리는 토양 내 암모니아 발생을 저감할 수 있음
 - 농가에서는 퇴비 또는 퇴비+요소 복합 시비의 경우 요소분해효소 억제제 요소분해효소억제제를 활용하여 22% 수준 이하로 암모니아의 발생량을 감소 시킬 수 있을 것으로 평가됨
 - 요소와 퇴비를 함께 시비할 경우, 요소분해효소 억제제를 처리하면 초기 토양 내 암모니아의 발생을 억제하여 장기간에 걸쳐 질소원을 토양에 저장 및 공급함으로 추가적인 요소 비료의 사용을 저감할 수 있어 경제적, 환경적 이점을 가질 수 있음
 - 바이오차의 경우 초기에는 효과가 있는 것처럼 보였으나, 5일 이부터는 퇴비+요소 처리구보다 오히려 암모니아 발생량이 2.60배 더 많이 발생하는 것으로 보아 요소분해효소 억제제로 적합하지

않다는 것으로 평가됨

- 향후 퇴비+요소 비료에 요소분해효소 억제제를 처리하였을 때 작물의 생장과 수확량에 대한 추가적인 연구와 그 작물을 사람이나 동물이 먹었을 경우 유해하지 않은지에 대한 연구가 필요함

<참고문헌>

국립원예특작과학원. 2016. 자급자족 텃밭 라이프 나만의 퇴비 만들기. 농촌진흥청.

국립축산과학원. 2019. 친환경 축산을 위한 올바른 가축분뇨 퇴비 만들기. 농촌진흥청.

국립축산과학원. 2023. 가축분뇨 처리와 자원화. 농촌진흥청

(사)한국축산환경학회. 2021. 한우분뇨가 환경오염에 미치는 영향 연구. 한우자조금관리위원회

환경부. 2019. 2020년 시행 대기오염물질 배출허용기준 확정 공포.

Akiyama, H., Tsuruta, H., and T. Watanabe. 2000. N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere-Global Change Science* 2: 313-320.

Cahalan E, Ernfors M, Müller C, Devaney D, Laughlin RJ, Watson CJ. 2015. The effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on nitrous oxide and methane emissions after cattle slurry application to Irish grassland. *Agric Ecosyst Environ.* 2015;199:339-49. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.09.008>

Dalby, Frederik R., et al. "Synergistic tannic acid-fluoride inhibition of ammonia emissions and simultaneous reduction of methane and odor emissions from livestock waste." *Environmental Science & Technology* 54.12 (2020): 7639-7650.

Espindula, M.C., Rocha, V.S., Souza, M.A.D., Campanharo, M. and Pimentel, A.J.B. 2014. 요소분해효소 inhibitor (요소분해효소억제제) and efficiency of single or split application of urea in wheat crop. *Revista Ceres*, 61, pp.276-279.

Frederik R. Dalby, Simon Svane, Jens Jakob Sigurdarson, Morten K. Sørensen, Michael J. Hansen, Henrik Karring, and Anders Feilberg. 2020. Synergistic Tannic Acid-Fluoride Inhibition of Ammonia Emissions and Simultaneous Reduction of Methane and Odor Emissions from Livestock Waste. *Environmental Science & Technology* 54:7639-7650

Gu et al., 2014. Agricultural ammonia emissions contribute to China's urban air pollution. *Frontiers in Ecology & the Environment*. 12: 265-266.

Guo Jun-Li, Yi Liu, Wen-Xue Wei, Ti-da Ge, Guang-Jun Wang. 2019. Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil

Hristov AN. 2011. Technical note: Contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) in the United States. *J Dairy Sci*. 94(6):3130-6. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3681>

International Plant Nutrition Institute (IPNI), nNitrogen Notes: Ammonia Volatilization, Bulletin 6, [http://www.ipni.net/publication/nitrogen-en.nsf/0/B2191846507784650778DB985257DD60005826A/\\$FILE/NitrogenNotes-EN-6,\(2016\)](http://www.ipni.net/publication/nitrogen-en.nsf/0/B2191846507784650778DB985257DD60005826A/$FILE/NitrogenNotes-EN-6,(2016)).

Jens Jakob Sigurdarson, Simon Svane, Henrik Karring. 2018. The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. *Rev Environ Sci Biotechnol* 17: 241-258.

Khadim Dawar, Shah Fahad, M. M. R. Jahangir, Iqbal Munir, Syed Sartaj Alam, Shah Alam Khan, Ishaq Ahmad Mian¹, Rahul Datta, Shah Saud, Jan Banout, Muhammad Adnan, Muhammad Nauman Ahmad, Aamir Khan, Raf Dewil, Muhammad Habib-ur-Rahman, Mohammad Javed Ansari & Subhan Danish. 2021. Biochar and 요소분해효소 inhibitor mitigate NH₃ and N₂O emissions and improve wheat yield in a urea fertilized alkaline soil. *Scientific Reports* 11:17413. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96771-0>

Koolen CD, Rothenberg G. 2019. Air pollution in Europe. *ChemSusChem*. 12(1):164-72. <https://doi.org/10.1002/cssc.201802292>

Liyong Sun, Jia Li, Changhua Fan, Junyin Deng, Wei Zhou, Adila Aihemaiti, Uqkun Jan Yalkun. 2020. The effects of biochar and nitrification inhibitors on reactive nitrogen gas (N₂O, NO and NH₃) emissions in intensive vegetable fields in southeastern China. *Archives of Agronomy and Soil Science* 67:836~848

Majumdar, D. 2002. Suppression of nitrification and N₂O emission by karanjin—a

nitrification inhibitor prepared from karanja (*Pongamia glabra* Vent.). *Chemosphere* 47: 845–850.

Minet EP, Jahangir MMR, Krol DJ, Rochford N, Fenton O, Rooney D. 2016. Amendment of cattle slurry with the nitrification inhibitor dicyandiamide during storage: a new effective and practical N₂O mitigation measure for landspreading. *Agric Ecosyst Environ.* 2016;215:68–75. [https://doi.org/ 10.1016/j.agee.2015.09.014](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.014)

Naseem S, King AJ. 2018. Ammonia production in poultry houses can affect health of humans, birds, and the environment—techniques for its reduction during poultry production. *Environ Sci Pollut Res.* 25(16):15269–93. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2018-y>

Oenema O. Velthof G.L. 2012. Emissions from agriculture and their control potentials. TSAP Report #3. IIASA, (<http://gains.iiasa.ac.at/index.php/policyapplications/tsap/394-emissions-from-agriculture-and-their-control-potentials>)

Pereira J, Barneze AS, Misselbrook TH, Coutinho J, Moreira N, Trindade H. 2013. Effects of a 요소분해효소 inhibitor and aluminium chloride alone or combined with a nitrification inhibitor on gaseous N emissions following soil application of cattle urine. *Biosyst Eng.* 115:396–407. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.05.002>

Pozzer A, Tsimpidi AP, Karydis VA, De Meij A, Lelieveld J. 2017. Impact of agricultural emission reductions on fine-particulate matter and public health. *Atmos Chem Phys.* 17(20):12813–26. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12813-2017>

Prajapati, Sumitra. Cation exchange for ammonia removal from wastewater. MS thesis. 2014.

Priscila L.Simon, Jeferson Dieckow, Josileia A. Zanatta, Bruna Ramalho, Ricardo H. Ribeiro, Tony van der Weerden, Cecile A.M. de Klein. 2020. Does *Brachiaria humidicola* and dicyandiamide reduce nitrous oxide and ammonia emissions from cattle urine patches in the subtropics?. *Science of The Total Environment* 720

Sandy Hinden. 2022. An Important Change Point in Life on Earth. <https://sanfordhinden.com/blog/f/ an-important-change-point-in-life-on-earth>

Simon, Priscila L., et al. “Does *Brachiaria humidicola* and dicyandiamide reduce nitrous oxide and ammonia emissions from cattle urine patches in the subtropics?.” *Science of the Total Environment* 720 (2020): 137692.

Spek JW, Dijkstra J, Van Duinkerken G, Bannink A. 2013. A review of factors influencing milk urea concentration and its relationship with urinary urea excretion in lactating dairy cattle. *J Agric Sci.* 151(3):407–23. <https://doi.org/10.1017/S0021859612 000561>

Susana López-Aparicio, Cristina Guerreiro, Mar Viana, Cristina Reche, Xavier Querol. 2013. Contribution of agriculture to Air Quality problems in cities and in rural areas in Europe. ETC/ACM Technical Paper 2013/10 pp.13.

Ting Lan, Yong Han, Marco Roelcke, Rolf Nieder, Zucong Cai. 2013. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on gross N transformation rates and mitigating N₂O emission in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry* 67: 174–182

Tsimpidi AP, Karydis VA, Pandis SN. 2007. Response of inorganic fine particulate matter to emission changes of sulfur dioxide and ammonia: The Eastern United States as a case study. *J Air Waste Manag Assoc.* 57(12):1489–98. <https://doi.org/10.3155/1047- 3289.57.12.1489>

UK Agri-Tech Centres. 2022. Net Zero & Livestock – Exploring the farmer options. <https://www.fwi.co.uk/business/business-management/agricultural-transition/net-zero-livestock-exploring-the-farmer-options>

UNFCCC. 2022. https://di.unfccc.int/ghg_profile_non_annex1

USDA (U.S. Department of Agriculture). 2007. Ammonia a Particle Matter Precursor.

University of Massachusetts Amherst. Conserving ammonia in manure. UMass Extension Crops, Dairy, Livestock, Equine – www.umass.edu/cdl

Wyer, K.E., Kelleghan, D.B., Blanes-Vidal, V., Schauberger, G. and Curran, T.P. 2022. Ammonia emissions from agriculture and their contribution to fine particulate matter: A review of implications for human health. *Journal of Environmental Management*, 323, p.116-285.

Xu, X et al. 2002. 요소분해효소 and nitrification inhibitors to reduce emissions of CH₄ and N₂O in rice production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 64:203-211

부 록 (Appendix)

<출처 : 농촌진흥청, 2023년 가축분뇨 처리와 자원화>

1. 가축분뇨 퇴비화

□ 가축분뇨 퇴비의 개념

○ 가축분뇨 퇴비란

- 퇴비의 사전적 의미는 풀이나 짚 또는 가축의 배설물 따위를 썩힌 거름이고, 관련법에 의하면 가축분뇨를 발효시켜 만든 비료성분이 있는 물질 중 액비를 제외한 물질로서 농림축산식품부령으로 정하는 기준에 적합한 것으로 규정함
- 비료공정규격 설정 및 지정에서 정의하는 가축분 퇴비는 가축의 분뇨를 50% 이상 원료로 사용하고, 동 규정에서 지정하는 가축분 퇴비에 사용 가능한 원료를 2종 이상 혼합하여 발효 과정과 후숙 과정을 거쳐 제조한 것으로 정의함
- 좋은 가축분 퇴비가 되기 위해서 유기물이 주를 이루는 가축분이 적정한 퇴비화 조건 하에서 생물학적 분해 과정을 통해 분해가 끝난 상태로 작물과 토양에 유해하지 않아야 함

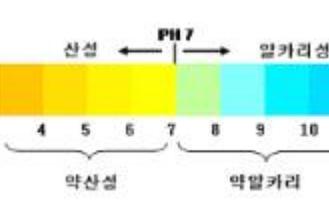
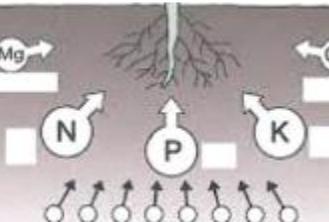
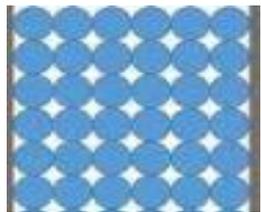
○ 가축분뇨 퇴비의 특성

- 양축농가들은 배합사료 위주로 사양을 하기 때문에 가축분뇨의 성분과 특성은 같은 축종의 경우 거의 유사하다고 볼 수 있음
- 퇴비제조방법 수분조절재 종류와 혼합량, 퇴비제조기술 등의 요인으로 최종 퇴비의 특성은 달라지며, 적절한 시기에 뒤집기를 통해 공기를 공급해주어 퇴비부숙과정이 원활하게 진행되도록 해주어야 함
- 퇴비화가 완료된 가축분 퇴비의 특성은 아래의 체크리스트로 확인하면 됨

내용	확인 여부
1. pH는 축종별 차이는 있지만 6~8.5 사이로 중성 또는 약 알칼리 상태를 유지한다.	
2. 질소와 인산 그리고 칼리의 함량은 축종에 따라 건물 기준 1~2.5% 내외가 된다.	
3. 퇴비의 수분함량은 비료공정규격 설정 및 지정 규정에 따르면 55% 이하로 유지한다.	
4. 유기물 함량은 30% 이상이고 유기물 대 질소의 비는 45 이하여야 한다.	
5. 염분은 건물 기준 2.0% 이하, 염산불용해물은 25% 이하 수준이다.	
6. 부숙도는 콤팩방법으로 측정한 경우 부숙 완료, 솔비타 법의 경우에는 부숙 후기 또는 부숙 완료, 종자발아법에 의한 발아지수는 70 이상의 상태를 유지해야 한다.	
7. 중금속류는 건물 기준 비소 45mg/kg, 카드뮴은 5mg/kg, 수은은 2mg/kg, 납은 130mg/kg, 크롬은 200mg/kg, 구리는 360mg/kg, 니켈은 45mg/kg, 아연은 900mg/kg을 넘어서는 안되며, 아주까리유박을 원료로 사용한 경우 리신이 10mg/kg을 넘어서는 안 된다.	
8. 병원성 미생물인 대장균 O157:H7이나 살모넬라 등이 검출되어서는 안 된다.	

○ 가축분뇨 퇴비의 기능

- 유기성 물질인 가축분과 수분조절재를 기반으로 제조하였기 때문에 부숙된 후에도 유기물과 영양물질을 함유하고 있으며, 잘 부숙된 가축분 퇴비는 다양한 기능을 가지고 있음

		
<p>1. 토양 유기물 공급</p>	<p>2. 비료 성분 느리게 방출 (완효성) 지속적 양분 공급 가능</p>	<p>3. 식물의 미량요소 공급</p>
		
<p>4. 토양의 산성도 완화</p>	<p>5. 토양 양이온 치환능력 개선</p>	<p>6. 부식물질(Humus)의 토양 물리성과 비옥도 개량</p>
		
<p>7. 토양의 공극률을 높여 공기 이동에 도움을 줌</p>	<p>8. 토양 미생물 및 지렁이 등 생물 군집 형성을 도움</p>	<p>9. 가축분 유용자원화 및 환경오염부하 경감</p>

- 유기성 비료자원으로서 토양에 환원하는 방법을 적용하여 경중분야 측면에

서 지력을 높임과 동시에 생산된 작물의 품질을 향상시킬 수 있으며, 경축 순환농업을 정착시키는데 도움을 줄 수 있음

□ 가축분뇨 퇴비화의 이해

○ 가축분뇨 퇴비화의 필요성

- 가축분뇨 퇴비화는 가축분뇨 처리기술 중 자원화처리 기술분야에 해당하며, 퇴비화를 통하여 수질 및 토양, 대기환경에 대한 오염을 줄이고 유용한 비료 자원으로 활용하는데 필요함
- 수질 오염으로 부영양화를 일으킬 수 있으며, 토양 오염은 지하수와 작물 등의 생육 장애를 일으킬 수 있음. 대기 오염은 흔히 온실가스나 미세먼지 그리고 냄새 등이 있음

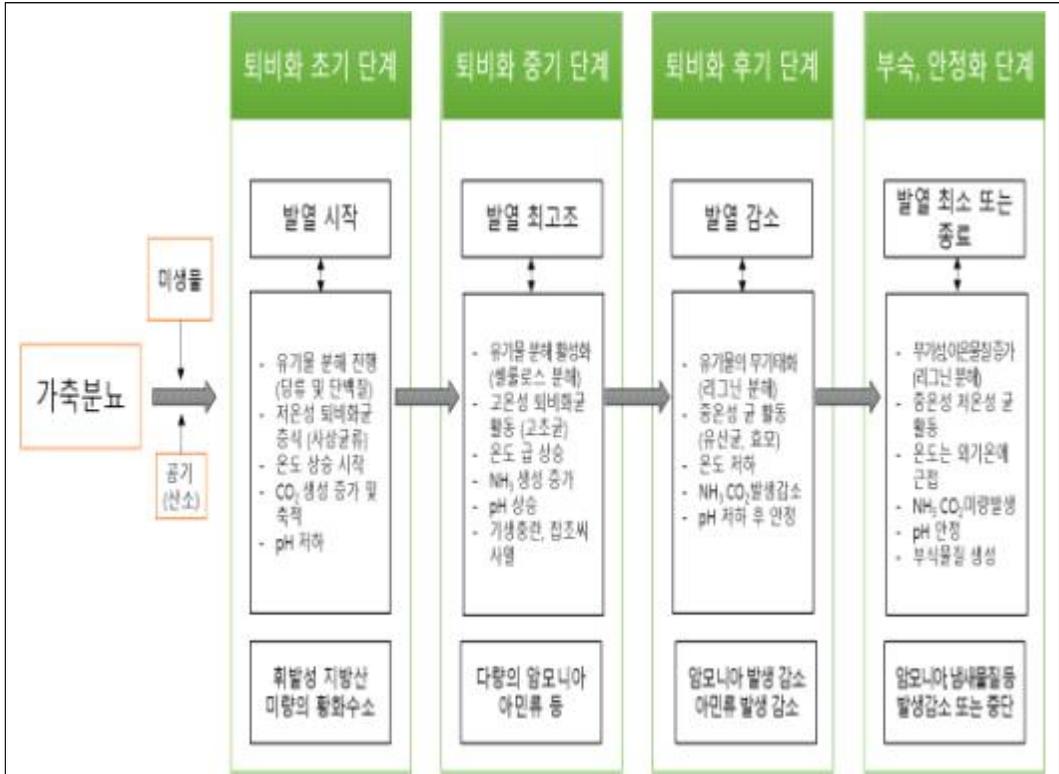
○ 가축분뇨 퇴비화의 진행 과정

- 가축분 퇴비화를 과거에는 ‘발효’로 구분하였으나, 환원에 의한 알코올 유기산 탄산가스 등을 생성하는 목적이 아닌 산화 및 분해를 통한 식물과 토양에 안정적인 반응이 일어나도록 하는 것이 목적이므로 ‘부숙’이라는 표현을 사용하는 것이 타당함
- 퇴비화 시설에서는 미생물을 위해 공기도 공급하고, 뒤집기나 교반도 해주며 수분이나 탄소/질소 비율도 맞춰주는 등의 노력이 필요함
- 퇴비화 과정중 어떤 미생물이 우점하느냐에 따라 부숙 기간과 냄새의 발생 강도 또한 달라지며, 퇴비화 효율에 영향을 미침
- 가축분 퇴비화 과정에서 유기물 부숙에 있어 수분 함량은 60~70% 수준이면 미생물의 증식과 활력 증진에 도움이 되며, 가축분뇨의 일반적 구성은 아래의 표와 같음

구분	수분	유기물	무기물
비율 (%)	70~85	13.5~27	1.5~3
구성 요소	간극수, 표면결합수, 모관결합수, 내부결합수	탄소, 질소, 인, 수소, 산소, 황 등의 화합물	점토나 모래, 탄산칼슘 등의 사료 첨가물, 금속류

<출처: 농촌진흥청>

- 가축분 퇴비화 과정은 다음과 같은 단계로 진행됨. 초기에는 가축분에 함유된 산소의 양이 충분하지 않은 상태로 탄소와 지방 등이 분해되면서 유기산과 지방산 등 산성물질이 형성되어 pH가 감소함
- 이후 단계에서 공기 공급에 따른 퇴비화 조건이 좋아지게 되면 질소로부터 기인하는 암모니아의 발생량이 늘어나면서 가축분의 경우 pH가 8.0 이상의 수준이 됨
- 암모니아 발생량은 점차 감소하는 반면 유기물 분해에 따른 이산화탄소 발생 등에 의해 pH가 약간 낮아지면서 안정화가 됨



〈출처: 농촌진흥청〉

회분식 가축분 퇴비화 진행 과정별 특성

- 퇴비화 초기단계에는 사상균, 세균이 활동하여 발열이 시작되고, 온도가 상승하기 시작하여 50℃ 이상이 되면 고온성 배실러스(*Bacillus*)가 우점하고, 외부 조건과 퇴비단의 상태에 따라 다르지만, 보통의 경우 2~3일, 늦어도 5일 이내에 최고온도에 도달하여 80℃ 이상까지 상승하는 경우도 있음
- 고온단계에서 높은 온도와 고농도의 암모니아 높은 pH로 인하여 잡초 씨앗과 해충의 알 그리고 비료공정규격으로 설정 및 지정에서 정하는 대장균 O157:H7이나 살모넬라 등의 유해 미생물이 사멸함.
- 최고온도 도달 후 1~2일 후에 퇴비단의 온도가 하강하기 시작하고 퇴비화가 완료되면 주변 기온보다 약간 높은 온도까지 하강하여 50℃ 이하로 내려가면 방선균 등이 활동하여 셀룰로스나 리그닌을 분해함
- 유의 사항으로는 퇴비단으로부터 암모니아나 이산화탄소 그리고 휘발성 산

류 등을 비롯한 아민류, 메르캡탄, 인돌류 등의 냄새 관련 물질이 발생하므로 냄새 가스 관리에 주의해야함

- 퇴비의 부숙도 관련 기준이 설정되어 시행되기에 퇴비단의 부숙도 규정에 의해 정해진 기준에 부합될 수 있도록 해야함

□ 가축분뇨 퇴비사 및 구성설비

○ 가축분뇨 퇴비사

- 퇴비화는 축사 내에서의 분뇨관리로부터 시작하여 가축분 수거→퇴적→뒤집기 및 교반→후숙까지의 작업과정이 최종 퇴비의 품질 및 부숙도와 밀접하게 연관됨
- 퇴비사의 구조물과 여기에 설치된 퇴비화 관련 시설 그리고 퇴비화 시설 운용 및 관리 기술이 중요하며, 시설의 구조물과 설비의 종류와 형태를 결정하고 적정하게 운영하는 것과 운용 기술에 대한 이해도 향상이 필요함

○ 가축분뇨 퇴비사 주요 구조물 및 종류

- 중·소규모 축산농가나 대규모 축산농가 등 퇴비사의 구조물과 설치된 시설의 형태가 적절해야하며, 퇴비화 진행 시 미생물이 활발하게 활동하면서 좋은 양질의 퇴비를 생산해 내도록 하는 환경을 조성해 주는 것이 퇴비화 관련 구조물과 설비 및 장비 그리고 시설 관리자의 역할임
- 퇴비사의 구조로는 분뇨저장조, 부숙조, 후숙조, 그리고 부대시설로 구성되며 일반적으로 철근 콘크리트나 금속재로 구성되어 있으며, 부식 측면에서는 콘크리트가 더 강한 내구성을 가짐

표. 가축분 퇴비사 구조물의 형태와 용도

종류	방식	형태	용도
1차 저장조	비송풍	시멘트 평 바닥	분뇨 임시저장
예비 부속조	비송풍	시멘트 평 바닥	가축분 1차 부속
	송풍	바닥에 산기장치 설비	
부속조	비송풍	시멘트 평 바닥	가축분 퇴비화
	송풍	바닥에 산기장치 설비	
	기계교반	시멘트 평 바닥 또는 바닥에 산기장치 설비 수직, 수평 밀폐형	
후속조	비송풍	시멘트 평 바닥	퇴비 완숙
선별, 포장실	-	시멘트 평 바닥	이물질 선별 퇴비포장
퇴비 창고	-	시멘트 평 바닥	포장퇴비 저장

<출처: 농촌진흥청>

□ 가축분뇨 퇴비화 기술

○ 가축분뇨 퇴비화 시 고려 요소

- 퇴비화는 국내에서 적용되고 있는 가축분뇨 자원화의 근간을 이루는 방법이고 실질적으로 세심하게 고려해야 하는 세부기술 관련 사항들이 예상보다 많은 방법에 해당함
- 양질의 퇴비를 만들기 위해서 우선적으로 고려해야할 요소가 퇴비화 시작 시 원료의 특성과 퇴비화 조건이 있으며 주요 고려 요소들이 잘 갖춰진다면 퇴비화는 무난히 진행될 수 있음
- 퇴비화 시작 시에 수분함량과 퇴비단의 높이 그리고 송풍량이 가장 중요하며 퇴비원료의 수분함량이 퇴비단의 통기성, 미생물의 활력에 직결되는 요소로서 퇴비화 기간 그리고 퇴비의 품질과 부속도까지 연결 됨

- 기존 퇴비단에 가축분뇨를 새로 추가할 경우 혼합하여 수분 함량이 잘 맞춰 지도록 해야하며 퇴비단 높이가 너무 낮으면 수분이 쉽게 증발하고 외기온의 영향을 많이 받게 됨.
- 겨울철 퇴비단 높이가 낮으면 저온으로 인하여 퇴비화가 안 될 수 있으며 산소농도는 송풍량 조절을 통해 적정량을 유지해야함

고려요소	적정수준	조절 방법
영양소 비율	탄소/질소 25~35 내외	분뇨와 수분조절재 혼합
수분 함량	65% 내외 (60~70%)	분뇨수분에 따라 수분조절재 혼합
산소 농도	10~13%	송풍, 주기적인 뒤집기 작업 수행
개시 시 퇴비 온도	10℃ 이상	퇴비사 방풍, 기존 퇴비단 혼합
퇴적 높이	60~200cm	혹한기 시에는 더 높은 수준으로 유지
입자 크기	2~5mm	뭉친 분뇨덩어리 파쇄

1) 영양소 비율

- 퇴비의 영양소 비율은 주로 탄소와 질소를 의미하며, 탄소는 미생물이 활동하는데 필요한 에너지로 쓰이고, 질소는 미생물 증식과 생장에 필요한 물질이기 때문에 두 물질의 비율이 적정히 유지되는 것이 중요함
- 탄소와 질소비 (C/N비)란 탄소의 양을 질소의 양으로 나눈 값을 말하며, 퇴비화시에 적절한 탄소와 질소의 비는 25~35 내외이며 적정한 탄소원 첨가를 위해 탄질비가 높은 수분조절재로 톱밥을 첨가함
- 가축분 자체는 탄질비가 20 내외이고 pH는 약알칼리성이므로 탄질비가 높고 약산성인 톱밥을 사용하면 퇴비원료의 수분조절과 탄질비 조절 그리고 pH 조절 효과를 기대할 수 있음

2) 수분 함량

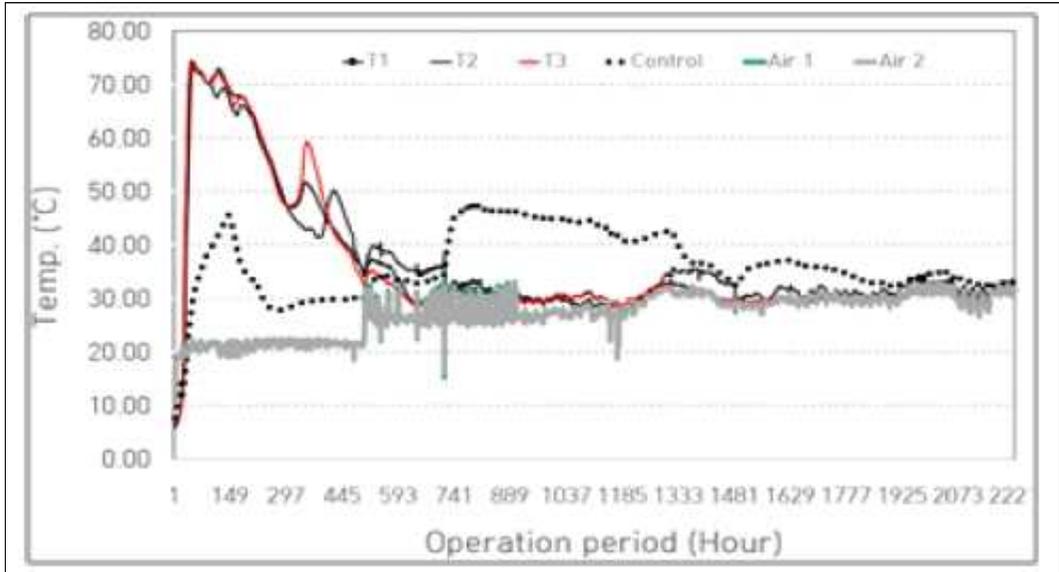
- 수분은 퇴비화 개시 단계에서 매우 중요하며 수분 함량은 65% 내외가 적절하며 50% 이하 ~ 75% 이상의 수분 함량에 해당하게 되면 퇴비화가 중지되거나 진행이 더디게 됨
- 수분조절재 혹은 기존 퇴비를 혼합하여 사용하되, 기존 퇴비의 경우 퇴비화 미생물의 접종원 역할을 하여 도움이 되지만, 수분 조절 능력이 낮고 염분 농도가 높아질 우려가 있으므로 주의하여야 함

3) 산소 농도

- 퇴비단 내에 존재하는 산소를 이용하여 퇴비화 미생물이 호흡하면서 유기물을 분해하며, 산소가 부족하게 되면 혐기성 미생물이 증식하여 퇴비화 효율이 나빠지게 되고 부패가 일어나 황화수소나 휘발성지방산 등의 악취 물질이 생성 될 수 있음
- 적절한 송풍장치 혹은 교반장치를 설치하여 산소 및 공기가 잘 통할 수 있도록 해야함

4) 퇴비사 온도

- 퇴비화의 온도는 미생물 활성화에 매우 중요하며 낮아도 10℃ 이상을 맞춰줘야 하는데 겨울철처럼 기온이 낮은 시기에 퇴비사에 가축분을 퇴적하면 원활한 퇴비화 진행이 안 될 수 있음
- 저온기에는 벽체를 점검 또는 정비하거나 윈치커튼인 경우에는 빈틈이 없도록 하며, 북서방향의 찬 바람을 막기 위한 목적으로 물건을 쌓아 두는 것도 방법임
- 퇴비화 과정에서 온도변화는 퇴비화 진행 정도를 추정할 수 있는 중요 지표이며, 생화학적으로 분해 가능한 유기물이 존재하면 퇴비화 과정을 거치면서 열이 발생하여 55~80℃ 까지도 온도가 올라갈 수 있음



출처: 농촌진흥청

<퇴비화 시 퇴비단의 온도>

- 회색선이 주변 공기의 온도이고 점선이 공기를 공급하지 않은 경우, 다른 색이 공기를 공급한 경우에 해당하며, 퇴비화 조건이 갖춰지면 퇴비 온도가 상승하고, 공기를 공급하지 않으면 온도 상승도 늦고 최고 온도도 낮아서 잡초씨나 유해균 사멸에 불리하다고 볼 수 있음
- 퇴비단 온도가 55°C 이상으로 연속적으로 3일 이상 유지되면 유해균 등이 사멸한다는 연구 결과가 있음

5) 퇴적 높이

- 퇴비단의 퇴적높이는 내부의 공극 형성 그리고 공기 이동 효과와 퇴비단의 온도 유지에 중요한 요인이며 0.6 ~ 2m 사이로 퇴적하는 것이 권장됨
- 2m 이상으로 높으면 퇴비단의 무게로 인하여 공극이 막혀 공기와 가스의 이동이 원활하지 못하여 퇴비화가 저해되고, 너무 낮은 경우에는 외기의 영향을 많이 받아 퇴비단이 건조되기 쉽고 퇴비사 이용 효율이 떨어지게 됨

6) 입자 크기

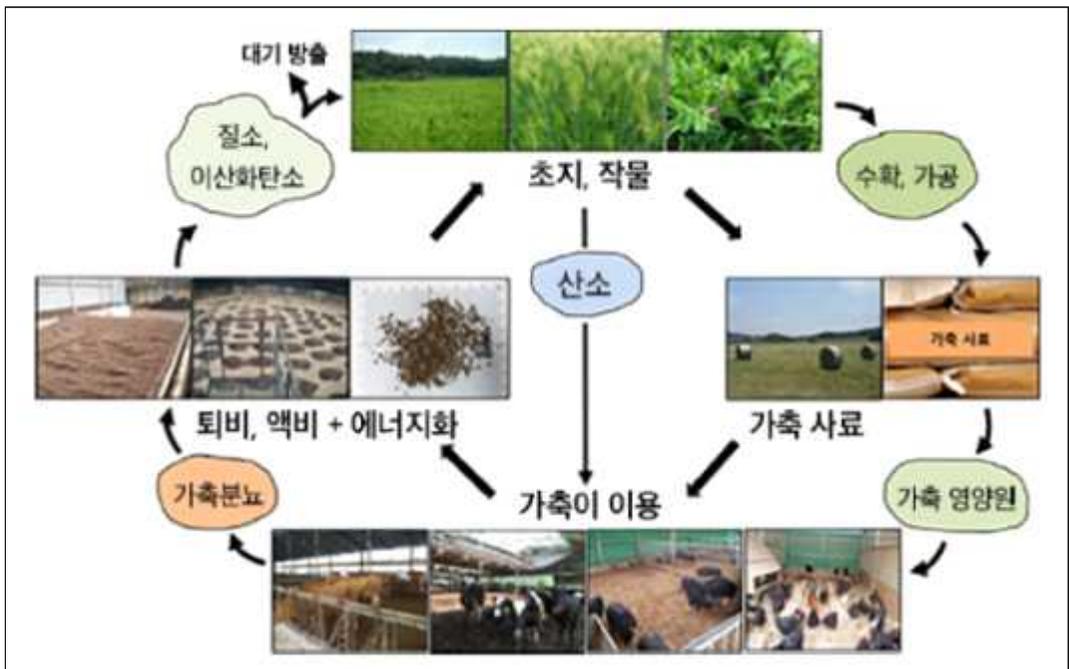
- 퇴비화될 때 유기물의 분해는 입자 내부보다 표면에서 더 활발히 진행되며, 미생물이 유기물 입자의 표면부터 분해해서 내부로 들어감

- 입자 크기가 너무 크면 퇴비화 시간이 길어지고 미생물의 활력이 감소하게 되는 반면, 입자 크기가 너무 작으면 공극 형성이 좋지 않아 미생물이 필요로 하는 공기 흐름이 원활하지 못하게 됨
- 퇴비화의 입자 직경은 2~5mm정도가 바람직하며 덩어리진 가축분의 경우는 최대한 깨트려 주어 공극 형성이 잘 되고 입자 크기를 다양하게 만들어 주는 것이 좋음

□ 퇴비 부숙도

○ 가축분뇨 퇴비부숙 개요

- 가축분 퇴비 부숙도는 가축분을 퇴비화하였을 때 최종적으로 생산된 퇴비가 식물과 토양에 안정적인 반응을 나타내는 것이 중요하며, 가축분 퇴비화의 주목적이 가축분 처리 자체가 아닌 경지에 순환하는 것이기 때문에 토양, 수질, 그리고 대기 환경에 도움이 되는 수준까지 부숙 되는 것이 중요함



출처: 농촌진흥청

<경종과 축산이 연계된 물질 순환 체계>

- 경종, 축산간 물질순환은 가축분의 처리와 이용에 의해서 이루어지는데 퇴비화와 액비화 그리고 에너지화에 의한 양분순환과 탄소순환에 의해 이루어지며, 주된 순환 방법은 퇴비화이며 80% 이상의 비율을 차지함

○ 가축분뇨 퇴비부숙도의 이해

- 모든 농가에서 퇴비 부숙도를 검사하도록 2021년 3월 25일에 시행되었으며, 농가 규모에 따라 신고 규모 농가는 연 1회 검사하여야 하고, 허가 규모 농가는 6개월에 1회씩 연 2회 검사를 해야하며 퇴비 부숙도 검사결과는 3년간 보관해야함 (위반시 과태료 부과)

1) 퇴비의 부숙도 측정 방법

- 퇴비의 부숙도 측정방법은 비료관리법 시행령 제 15조에 따른 비료품질검사 방법 및 시료채취기준에 따라 다음 중 하나의 방법을 적용함
- 암모니아와 이산화탄소 발색반응을 이용한 기계적 부숙도 측정방법(콤백, CoMMe-100)을 이용한 측정법
- 암모니아와 이산화탄소 발색반응을 이용한 기계적 부숙도 측정방법(솔비타, Solvita)를 이용한 측정법
- 상기 검사 후에도 냄새에 의한 부숙이 의심될 때에는 종자발아법으로 하며 부숙 완료 단계의 퇴비의 발아지수는 70 이상으로 함

2) 퇴비의 부숙도 판정 기준

- 퇴비 부숙도 판정은 기계적 측정법 중 콤백과 솔비타를 이용한 측정법을 따르며, 미부숙, 부숙 초기, 부숙 중기, 부숙 후기, 부숙 완료 단계로 구분함

구분	콤백(CoMMe-100)	솔비타(Solvita)
미부숙	부숙이 거의 진행되지 않은 상태	1
부숙 초기	부숙이 진행되는 초기 상태	2
부숙 중기	부숙 기간이 좀 더 필요한 상태	3
부숙 후기	퇴비의 부숙이 거의 끝나가는 상태	4~6
부숙 완료	퇴비의 부숙이 완료됨	7~8

3) 소규모 농가 퇴비의 부숙도 검사 의무 면제

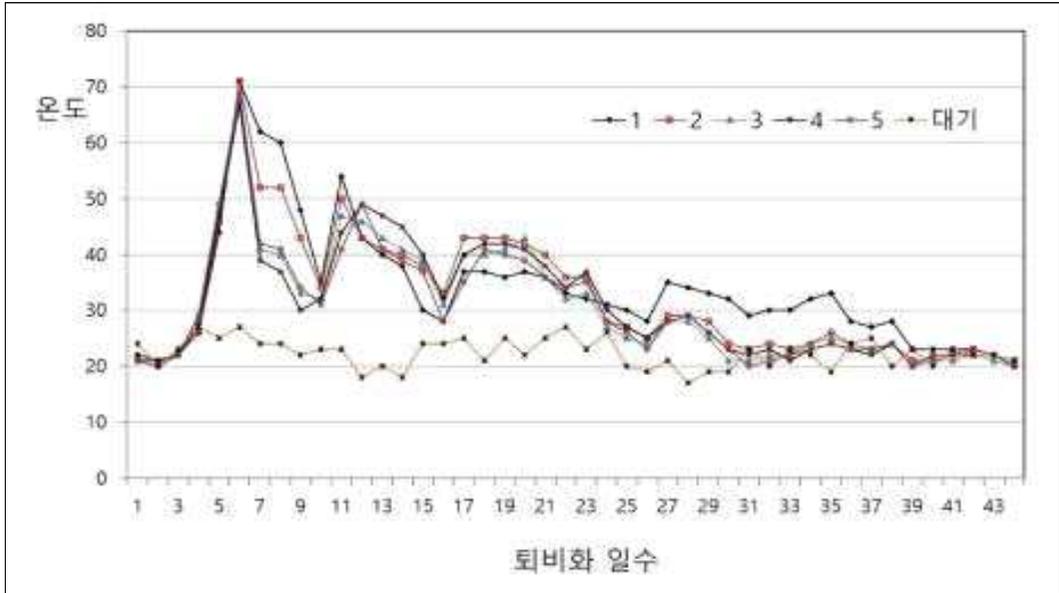
- 소규모 농가의 경우 1일 300kg 미만의 가축분뇨 배출농가의 퇴비 부숙도 검사 의무는 면제되며, 한우의 경우 사육규모 또는 두수가 264m² (22두)까지 적용됨
- 검사 의무에서 제외되더라도 미 부숙에 의한 피해방지를 위해 봄철 등 퇴비 집중 살포 전에 1회 이상 검사하는 등 부숙 기준을 맞춰야함

○ 가축분뇨 퇴비의 부숙상태에 대한 관능적 판정

- 현장에서 부숙도 측정장치를 이용하여 판정하는 것은 어렵기 때문에 퇴비사 운영, 관리자가 퇴비의 외형적 성상이나 온도, 냄새 등 몇 가지 향태를 근거로 부숙 정도를 판정할 수 있음

1) 온도

- 가장 직접적으로 부숙정도를 판정할 수 있는 지표로 유기물을 미생물이 분해하는 과정에서 발생하는 열이 퇴비단에 축적되고 그 온도는 70℃ 이상으로도 올라갈 수 있으나 온도가 30~40℃ 정도 또는 그 이상이 된다면 부숙이 완료된 상태라고 보기 어려움
- 잘 조절된 조건을 갖춘 퇴비의 경우 외부 온도에 접근하는 경향을 보이며, 깊이별로 손을 대봐서 온도가 낮으면 부숙이 된 것으로 판단해도 무방하나 막대형 온도계를 몇 군데 설치해서 그 온도 값을 기준으로 부숙도를 추정할 수 있음

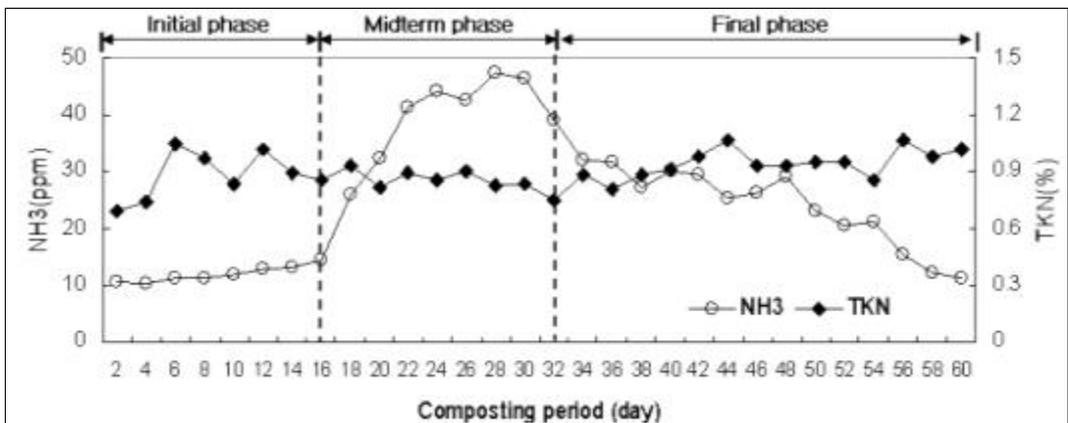


출처: 농촌진흥청

<퇴비화 일수에 따른 퇴비 온도 변화>

3) 퇴비단의 냄새

- 퇴비단에서 발생하는 냄새는 온도와 함께 퇴비의 부숙 상태를 알려주는 지표로 사용되며 냄새가 약하거나 느껴지지 않는다면 부숙이 완료되었거나 완료 단계에 있는 것으로 판단할 수 있음



출처: Kim et al. 2006

<퇴비화 일수에 따른 퇴비 암모니아 및 TKN 농도 변화>

- 퇴비단의 온도 변화와 거의 비슷한 경향을 보이는데, 이것은 유기물의 분해가 일어나면서 암모니아 가스가 발생하기 때문이며 냄새가 발생하고 있다면 아직 부숙이 덜 된 것을 의미함

3) 퇴비입자의 외형

- 퇴비단의 외형에 따라 부숙도를 측정할 수 있는데 퇴비화 개시 시에는 뚜렷하게 톱밥 모양이나 분뇨 입자의 외형을 알아볼 수 있으나, 시간이 지남에 따라 점차 부스러지고 외관이 부드럽게 변함
- 입자의 강도 또한 약해져 손으로 만지면 쪼개지거나 얇게 늘어남

4) 퇴비의 색

- 축분과 수분조절재의 종류에 따라 색은 달라지지만 부숙 초기에는 검정색이나 흑녹색을 띠다가 부숙이 진행되면서 검정색이 열리는 경향이 나타남
- 한우분의 경우 흑색 또는 흑녹색을 띠 수 있으며, 톱밥이 혼합되고 마른 상태가 되면 갈색 계열이 나타나기도 함

4 암모니아 발생량



퇴비 or 퇴비+요소

+



요소분해효소 억제제
NBPT

퇴비 or 퇴비 + 요소 복합 시비의 경우, 요소 분해 효소 억제제 NBPT를 활용하여 암모니아 발생량을 22% 수준 이하로 감소시킬 수 있을 것으로 기대됩니다.

4 암모니아 발생량



퇴비+요소

+



요소분해효소 억제제
NBPT

요소와 퇴비를 함께 시비할 경우, NBPT 처리를 하면, 도랑 내 암모니아의 발생을 억제하고, 첨가제에 의해 질소변을 포함한 가장 최 유급료로서 추가적인 요소 원료의 사용률 절감도 가능합니다. **경제적으로도, 환경적으로도 이점을 가질 수 있습니다.**

4 암모니아 발생량



퇴비+요소

+



바이오플라스 + 숲
바이오플라스

퇴비+요소+바이오플라스 처리한 처리구의 경우, 최종 3일경도는 암모니아 발생을 감축효과가 있는 듯 하였으나 그 이후부터는 더 높은 암모니아 발생현상과 무려 2.60배 더 많은 암모니아 가스가 발생하였습니다.

5 향후 연구 필요



NBPT의 영향	작물의 생장과 수확량	생육시 안전 여부
2015년 10월 10일 NBPT를 처리하면 ↓	겨울이 영하로 내려가면 어떤 추가적인 연구 필요	그 기온을 15도 이하로 낮추고 10도 이하로 낮추는 것

「본 보고서에 대한 지적재산권은 한우자조금관리위원회에 있으며, 본 연구결과 및 내용의 일부 또는 전부를 인용하는 경우에는 한우자조금관리위원회 자료 인용에 대한 내용을 명기한 경우에만 사전승인 없이 무상으로 인용할 수 있음」