

위성 데이터 활용 축산업과 암모니아 농도 관계 분석 연구

권오성



위성 데이터 활용 축산업과 암모니아 농도 관계 분석 연구

권오성



연구 담당

권오성 | 부연구위원 | 연구 총괄, 제1~5장, 부록 집필

정책연구보고 P2025-09

위성 데이터 활용 축산업과 암모니아 농도 관계 분석 연구

등 록 | 제6-0007호(1979. 5. 25.)

발 행 | 2026. 2.

발 행 인 | 한두봉

발 행 처 | 한국농촌경제연구원
우) 58321 전라남도 나주시 빛가람로 601
대표전화 1833-5500

인 쇄 처 | 크리커뮤니케이션

I S B N | 979-11-6149-841-6 95520

※ 이 책에 실린 내용은 한국농촌경제연구원의 공식 견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

※ 이 책에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다.

무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다.

국내 축산업의 성장으로 국민의 안정적인 단백질 공급과 농가소득이 증대되는 긍정적인 효과가 나타났다. 하지만 가축 사육 규모 확대와 집약화로 인한 축산환경오염 문제가 점차 심화하는 경향을 보인다. 특히 축산악취를 유발하는 암모니아는 축산농가와 지역사회의 갈등을 유발하는 물질로 지적되고 있으며, 초미세먼지 생성에 참여하는 물질로써 대기오염을 심화시키는 요인으로 작용한다. 국내 암모니아 측정 인프라는 충분히 구축되지 않았으며, 축산활동과의 연관분석도 부족한 상황으로 이에 관한 연구가 필요한 실정이다.

이 연구는 위성 관측자료를 활용하여 암모니아의 시·공간 자료와 축산활동 자료를 결합하여 암모니아와 축산활동 간의 상관관계를 분석하였다. 또한, 앞선 분석에 기상변수와 다른 축산업 변수를 포함하여 상관관계를 계량적으로 추정하였다. 이를 토대로 국내 암모니아의 시·공간 분포 특성과 축산업과의 상관분석 결과를 바탕으로 암모니아 규제를 체계적으로 수립하기 위한 정책 방향을 제시하였다. 또한, 본 연구는 지속적인 자료 수집과 구축을 통해 축산활동과 암모니아 간의 관계를 정밀하게 분석할 필요성을 제기한다.

본 연구의 결과가 축산농가와 지역주민의 사회적 갈등을 해소하기 위한 사전 연구로서, 국내 축산환경 분야에서 효율적인 암모니아 관리정책을 수립하는 데 기여하고 이를 위한 기초자료로 활용되기를 기대한다. 연구 자료 수집에 도움을 주신 축산경제연구실과 바쁘신 와중에 설계, 원내 세미나를 통해 자문에 응해주신 원내·외 자문위원들께도 감사의 뜻을 표한다.

2026. 2.

한국농촌경제연구원장 **한 두 봉**

연구 목적

- 국내 축산업의 지속적인 성장은 농가 소득증대와 국민경제 활성화에 기여하고 있으나, 가축 사육 마릿수 증가에 따른 환경문제를 야기하고 있음. 특히 가축 사육과정에서 배출되는 암모니아(NH_3)는 축산악취를 유발하여 사회적 갈등을 유발하고, 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 전구물질로 작용하여 대기질 악화를 초래하여 체계적 관리의 필요성도 함께 제기됨.
- 본 연구에서는 위성 관측자료를 활용하여, 대기 중 암모니아 농도 분포의 시·공간적 특성을 파악함으로써 암모니아 오염의 분포와 변동을 체계적으로 파악하였음. 또한, 이를 축산농가 자료와 결합하여, 주요 축종별 사육 마릿수 변화와 분뇨처리시설 등의 축산업 활동과 암모니아 간의 상관관계를 분석하는 데 목적이 있음.

연구 방법

- 이 연구는 축산업 활동과 암모니아 간의 상관관계 분석을 위해서 문헌조사, 통계 자료 및 계량모형 분석 등을 실시하였음. 문헌조사에서는 가축 동향조사(국가데이터처), 국가미세먼지정보센터(기후에너지환경부) 등을 통해 국내외 축산업 현황 및 대기오염물질 배출 동향을 정리하였음. 계량 분석을 위한 축산업 변수는 가축위생방역지원본부의 팜스(Farms) 자료를 활용하여 주요 축종별 농가 위치, 사육 마릿수, 농가당 사육 마릿수를 연구에 활용하였음. 대기 중 암모니아 농도는 2021년부터 2025년까지 NASA의 JPSS-

1 위성이 관측한 연직분포 자료를 활용하였으며, 암모니아 관측값이 존재하는 격자 단위의 자료를 분석에 사용하였음. 또한, 기상 요인과 가축분뇨 공공 처리시설 관련 변수를 통제변수로 모형에 포함하였음.

- 본 연구는 이원 고정효과모형(Two-way Fixed Effects Model)을 활용하여, 격자별 특성과 시간에 따라 변하는 특성을 통제하여, 평균 암모니아 농도 초과 일수와 축산업 변수(축종별 사육 마릿수 및 농가당 사육 마릿수)의 상관관계를 추정하였음. 그리고 대기 중 암모니아 농도와 밀접한 관련이 있는 기온, 강수 등과 가축분뇨 공공 처리시설의 개수 및 처리용량을 분석에 추가하였음. 이러한 분석을 통해 암모니아 농도 초과 일수와 축산활동과의 관계를 정량적으로 규명하고자 하였음.

연구 결과

- 농림업생산지수에서 2024년 국내 축산업 생산금액은 24조 450억 원으로 지속적인 성장세를 보여주며, 축산업 생산지수 또한 장기적으로 상승하는 것으로 나타남. 축종별 사육 동향에서는 소, 돼지, 닭의 사육 규모화가 지속되는 것을 확인함. 또한, 국내 암모니아(NH₃) 배출량은 24~35만 톤 수준에서 정체되고 있으며, 농업부문에서 배출하는 비중이 전체의 74.5~83.6%를 차지함. 농업부문 중 암모니아 배출은 분뇨관리와 비료 사용농경지로 구분되며, 분뇨관리 부문이 차지하는 비중이 90% 이상으로 확인되었음. 이는 축산업 중심의 암모니아 배출 구조가 형성되었으며, 가축분뇨의 처리 및 관리의 필요성을 시사함.

- 암모니아 농도의 위성 관측자료를 대한민국 격자(14km×14km)에 표시하여 공간적 분포를 나타낸 결과, 2021년을 기준으로 나주, 영암 지역에 속한 격자에서 고농도 암모니아가 관측됨. 이는 격자에 속한 지역의 축종별 사육 마릿수 및 농가당 사육 규모 등의 영향 가능성을 시사함. 축산농장 분포 현황을 검토한 결과, 한·육우 농가는 전국적으로 분포되어 있으며, 젖소의 경우 대도시에 인접한 지역에 상대적으로 집중된 경향을 보임. 돼지 사육 농가는 경기 남부, 충남, 충북 지역에 다수 분포함. 닭 사육농가는 소규모 농가가 전국적으로 분포되어 있음을 확인함.

- 기초통계 및 예비분석에서는 위성 관측 암모니아 농도의 월평균 추세를 살펴본 결과, 봄과 초여름(5~6월) 사이에 고농도 발생을 통해 암모니아의 계절성을 확인하였음. 농업 활동의 증가, 기온 상승 등이 암모니아 농도상승과 연관될 가능성이 존재함. 전체 분석 기간의 암모니아 농도를 평균한 값을 초과한 일수 분포를 살펴본 결과, 농·축산활동이 활발한 김제, 예산, 홍성, 나주 등의 공간 격자에서 높은 빈도수가 관찰됨. 앞서 제시한 격자별 암모니아 농도 초과 일수와 축산업 변수를 함께 비교하여 관계를 살펴봄. 소의 사육 마릿수가 82만 1,000마리로 가장 많은 격자(안성·진천·천안 일부)에서 평균 암모니아 농도 초과 일수가 59일로 가장 높은 수준을 기록함. 돼지와 닭의 사육 마릿수가 많은 지역에서 평균 농도 초과 일수가 높게 나타남. 축종별 사육집약도의 경우, 소의 농가당 사육 마릿수가 103마리인 격자(안성·진천·천안)에서 평균 암모니아 농도 초과 일수는 59회로 높은 수준을 보임. 또한, 구례·남원·하동의 격자(108마리/호)에서는 평균 농도 초과

일수가 22회로 높게 나타남. 돼지의 경우, 사육집약도와 평균 농도 초과 일수의 뚜렷한 패턴이 보이지 않음. 닭의 농가당 사육 마릿수가 높은 격자에서는 농도 초과 일수 또한 56회로 높은 수준을 보임.

- 축산업 변수와 암모니아 간의 상관관계를 이원 고정효과분석을 활용한 결과는 다음과 같음. 소의 사육 마릿수 증가로 인해 암모니아 배출량이 증가할 경우, 평균 암모니아 농도 초과 일수가 증가하는 경향이 나타났으며, 두 변수 간의 통계적으로 유의미한 양(+)의 상관관계를 확인하였음. 위성 관측 격자 내 소의 암모니아 배출량 1톤 증가와 평균 농도 초과 발생일수 0.36일 증가는 통계적으로 유의하게 연관됨. 또한, 기상 요인을 추가한 모형에서 소의 암모니아 배출량과 평균 농도 초과 일수 간에 양(+)의 관계를 확인하였음. 폭염일수가 증가할수록 평균 농도 초과 일수는 증가하는 경향을 보였으며, 반대로 강한 강수일수는 초과 일수를 감소시키는 음(-)의 상관관계를 나타냄. 주요 축산업 변수로서 축종별 사육 규모(농가당 사육 마릿수)를 활용하여 분석한 결과, 소 축사가 규모화된 농가일수록 평균 초과 일수가 유의미하게 증가하는 경향을 확인함. 반면 다른 주요 축종(돼지, 닭)에서는 축산업 변수와 대기 중 암모니아 평균 농도 초과 일수의 유의미한 상관관계를 확인하지 못함. 이는 불균형 패널데이터의 한계와 주요 축종의 사육·경영형태의 차이로 인해 대기 중 노출된 정도가 다르게 적용될 가능성이 있음. 이는 위성 관측자료가 지속적으로 축적되고 있는 만큼, 향후 장기간 자료를 활용한 지속적 연구의 필요성이 제기됨.

정책 제언

- 암모니아 지상 관측망과 위성 자료를 연계한 통합 모니터링 체계 구축이 필요함. 본 연구에서는 NASA의 위성 데이터를 활용하여, 격자 단위의 대기 중 암모니아 농도를 분석에 사용함. 이는 전국 단위의 공간적 분포 및 실시간 농도변화를 관측하는 데 유용함. 전국 단위의 암모니아 상시 측정망을 확대하고, 이를 위성 자료와 결합 및 보정하여 시·공간 해상도가 높은 국가 단위의 축산환경 데이터베이스 구축이 필요함.
- 계절적 특성을 고려한 암모니아 관리정책이 요구됨. 대기 중 암모니아는 봄과 초여름에 연중 가장 높은 수준을 나타내며, 이는 농업 활동이 증가하고, 기온이 상승하는 기간과 연관된 것으로 보임. 반면, 겨울철에는 낮은 기온으로 휘발성이 감소하여 낮은 농도 패턴을 보임. 이러한 변동성은 암모니아 배출이 특정 시기에 집중되며, 고배출 시기에 저감 조치를 강화할 필요성을 시사함.
- 축산활동이 활발한 지역에 대한 차별화된 관리 전략이 필요함. 암모니아의 공간적 분포에서는 축산활동이 활발한 지역이 대기 중 암모니아 농도와 일정 부분 연관될 가능성을 시사함. 따라서 단순히 악취관리 지역규제와 같은 획일적 규제보다는 축산 밀집도 등을 고려한 저감 시설 지원 확대, 분뇨관리 강화, 맞춤형 배출관리 기준 적용 등의 관리전략을 마련할 필요성을 제시함.

-
- 축종별 경영 특성과 사육 형태에 따라 차별화된 정책 설계와 지원제도가 필요함. 주요 축종과 암모니아와의 상관관계를 분석하여, 유의미한 양(+)의 관계로 추정될 경우, 축사 밀폐, 저감 시설 설치 및 신속한 분뇨 처리체계 구축 등 축종별 시설 현대화와 운영 개선을 지원하여 암모니아 농도상승을 완화할 노력이 필요함을 시사함.

제1장 서론

- 1. 연구의 필요성과 목적 1
- 2. 연구내용 및 방법 4
- 3. 선행연구 검토 및 차별성 6

제2장 국내 축산업과 축산환경 현황

- 1. 국내 축산업 현황 11
- 2. 국내 축산환경 현황 20

제3장 국내외 축산업 대기오염물질 배출현황 및 정책

- 1. 국내 현황 25
- 2. 국외 현황 39

제4장 축산업과 암모니아 농도의 실증분석

- 1. 분석 데이터 55
- 2. 기초통계 및 예비적 분석 66
- 3. 분석모형 73
- 4. 분석 결과 76

제5장 요약 및 결론

- 1. 주요 분석 결과 89
- 2. 연구의 시사점 90
- 3. 연구의 한계 및 향후 과제 91

부록

1. 암모니아와 축산활동 관계 분석을 위한 기초통계량	93
2. 암모니아와 축산활동 간 관계에 대한 추가 실증분석 결과	94
참고문헌	97

제2장

〈표 2-1〉 축산업의 환경오염 21
 〈표 2-2〉 축산업의 환경오염 문제와 규제정책 23

제3장

〈표 3-1〉 국내 연도별 대기오염물질 배출량(2010~2023) 26
 〈표 3-2〉 국내 배출원별 암모니아 배출량(2010~2022) 28
 〈표 3-3〉 국내 농업부문 암모니아 배출량(2010~2023) 29
 〈표 3-4〉 축종별 암모니아 배출계수 30
 〈표 3-5〉 분뇨관리 부문 내 축종별 암모니아 배출량(2010~2023) 31
 〈표 3-6〉 분뇨관리 부문 시·도별 암모니아 배출량(2013~2023) 32
 〈표 3-7〉 시·도별 비료 사용 부문 암모니아 배출량(2013~2023) 33
 〈표 3-8〉 국내 축산악취 민원 현황(2014~2023) 34
 〈표 3-9〉 농업 연관 시설의 배출허용기준 36
 〈표 3-10〉 축산업 부분의 악취배출시설 38
 〈표 3-11〉 복합악취 배출허용기준 38
 〈표 3-12〉 국가별 암모니아 배출 변화율(2005년 대비) 41
 〈표 3-13〉 미국의 국가 대기질 관리 기준 47
 〈표 3-14〉 미국 농업부문 연간 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 배출 비율 48
 〈표 3-15〉 미국 농업부문 연간 암모니아 배출 비율 49

제4장

〈표 4-1〉 축종별 사육 마릿수 및 평균 암모니아 농도 초과 일수(2021~2025) ... 70

〈표 4-2〉 축종별 농가당 사육 마릿수 및 평균 암모니아 농도 초과 일수(2021~2025)	73
〈표 4-3〉 암모니아와 축산활동 분석 결과	78
〈표 4-4〉 기상요건을 고려한 암모니아와 축산활동 분석 결과	81
〈표 4-5〉 농가 수 및 농가당 사육 마릿수와 평균 암모니아 농도 초과 일수 TWFE 분석 결과	83
〈표 4-6〉 분뇨처리시설 변수를 포함한 평균 암모니아 농도 초과 일수 고정효과모형 분석 결과	84
〈표 4-7〉 임계값 변경을 통한 주요 이중 고정효과모형 분석 결과	86
〈표 4-8〉 암모니아(NH ₃) 고·저농도 클러스터(Cluster)별 고정효과모형 추정 결과	87

제2장

<그림 2-1> 국내 축산업 생산액 및 생산지수(2000~2023) 12

<그림 2-2> 축종별 연도별 생산액 추이(2000~2023) 13

<그림 2-3> 축산물별 연도별 생산액 추이(2000~2023) 14

<그림 2-4> 한·육우 농가 구조 및 사육 규모 변화(2000~2025) 15

<그림 2-5> 젖소 농가 구조 및 사육 규모 변화(2000~2025) 17

<그림 2-6> 돼지 농가 구조 및 사육 규모 변화(2000~2025) 18

<그림 2-7> 닭(산란계, 육용계) 농가 구조 및 사육 규모 변화(2000~2025) 19

제3장

<그림 3-1> 연도별 암모니아(NH₃) 배출량 변화 27

<그림 3-2> EU-27의 암모니아 배출현황(2010~2022년) 40

<그림 3-3> EU의 미세먼지(PM_{2.5}), 암모니아(NH₃) 감축 현황
(2005년 대비) 41

<그림 3-4> 네덜란드의 암모니아 배출량 42

<그림 3-5> 덴마크의 암모니아 배출량 44

<그림 3-6> 1990~2023년 연평균 미세먼지 농도 변화 추이 48

제4장

<그림 4-1> 대한민국 연평균 암모니아(NH₃) 공간분포(2021년, 2023년) 57

<그림 4-2> 한·육우 농가 위치 분포(2021~2025) 59

<그림 4-3> 젖소 농가 위치 분포(2021~2025) 60

<그림 4-4> 돼지 농가 위치 분포(2021~2025) 61

〈그림 4-5〉 닭 농가 위치 분포(2021~2025)	62
〈그림 4-6〉 가축분뇨 공공 처리시설 분포(2021~2024)	63
〈그림 4-7〉 국내 날씨 측정소 위치 분포(2021~2025)	65
〈그림 4-8〉 국내 월평균 암모니아 농도 추이(2021~2025)	66
〈그림 4-9〉 암모니아 평균 농도 초과 일수의 분포(2021~2025)	67
〈그림 4-10〉 축종별 총 사육 마릿수 분포(2021~2025)	69
〈그림 4-11〉 축종별 농가당 사육 마릿수(2021~2025)	72
〈그림 4-12〉 암모니아 고·저농도 지역의 공간적 군집(Cluster) 분류	88

1

서론

1. 연구의 필요성과 목적

1.1. 연구 배경과 필요성

1.1.1. 연구의 배경

○ 국내 축산업은 생산성 향상과 규모화를 통해 꾸준히 성장하며, 국민의 영양공급, 연관산업의 발전, 농업소득 증대 등 국민경제 성장에 기여해 왔음. 그러나 축산업에서의 수질오염, 악취, 온실가스 배출, 토양의 양분 과잉 등 다양한 환경문제에 직면하고 있음.

- 축산부문의 악취 또는 대기오염물질 감축이 탄소중립(Net-zero) 이행을 위한 정책목표로 설정되어 대기환경 측면에서의 축산환경 연구가 필요함.

○ 축산업에서 배출하는 대기오염물질 중 하나인 암모니아(NH_3 , Ammonia)는 수소와 질소가 결합하여 생성된 화합물로서, 특유의 자극성 냄새를 가지며,

악취를 발생시키는 주요 원인으로 환경 민원을 발생시킴. 이는 지역주민의 생활 불편과 함께 축산농가와 지역사회 간의 갈등의 원인이 됨.

- 또한, 암모니아는 악취 민원뿐만 아니라 대기질 저하와도 밀접한 관련이 있음. 암모니아는 초미세먼지(PM_{2.5}) 형성에 기여하는 전구물질로서, 대기 중 질소산화물(NO_x) 등과 반응하여 미세먼지를 포함한 다양한 2차 오염물질을 생성함(Hristov, 2011).
- 암모니아는 이러한 2차 오염물질이 인간 건강에 미치는 잠재적 영향이 우려되며(Ge et al., 2020; Naseem & King, 2018), 인간의 건강과 생활환경 보호를 위해 「대기환경보전법」과 「악취방지법」에 따라 다양한 규제가 적용되고 있음.

1.1.2. 연구의 필요성

- 가축을 사육하는 과정에서 발생하는 암모니아는 축산악취를 유발하고 주변 생활환경에 직접적인 영향을 미쳐, 민원 발생 등 사회적 갈등을 초래함.
 - Blanes-Vidal et al.(2012)은 지역 대기질 모니터링 지점에서 측정·추정된 NH₃ 농도와 악취로 인한 불쾌감의 발생률은 유의한 상관관계가 있다고 분석함. 이는 대기 중 NH₃ 농도가 주거지역의 악취 불쾌감 발생률을 설명 및 예측하는 지표로 활용될 수 있음을 시사함.
 - Chanonsirivorakul & Nimsuk(2020)은 암모니아 농도가 높아질수록 인간이 인지하는 악취의 강도가 증가한다는 점을 실험적으로 확인하여, 암모니아 농도가 인간의 악취 인식과 밀접한 관련이 있음을 시사함.
- 국내 농업부문의 암모니아 배출량은 약 20만 2,000톤으로 전체 암모니아 배출량의 84%를 차지함.¹⁾ 농업부문의 암모니아는 대부분 농경지의 질소비료

처리와 축산의 가축분뇨관리 과정에서 주로 발생하며, 축산업이 전체 암모니아 배출량에서 차지하는 비율은 상당히 높은 수준으로 나타남.²⁾

- 하지만, 실제 축산업의 활동 규모와 대기 중 암모니아 간의 상관관계를 분석한 국내 연구는 부족한 실정임.

○ 정민국 외(2021)는 축종별 암모니아 배출계수를 사용하여 축산악취에 따른 사회적 비용을 계산한 결과로 양돈 3,401억 원, 거금 2,064억 원, 한육·우 1,435억 원으로 축종별 배출영향을 설명하는 기초자료를 제공함.

- 축종별 배출영향이 상이하다는 선행연구를 바탕으로, 축산활동을 세부 축종으로 구분하여, 대기 중 암모니아와의 연관성을 실증적으로 분석할 필요가 있음.

○ 또한, 암모니아 농도는 시·공간적으로 이질적인 분포를 나타내며, 이는 계절적 요인, 축산업 밀집도, 기상 요인 등 다양한 원인에 의해 결정됨. 따라서 암모니아 변동 특성을 더 정확히 이해하기 위해서는 앞선 요인을 통합적으로 고려한 실증분석이 요구됨.

1.2. 연구 목적

○ 본 연구는 2021년 2분기에서 2025년 2분기까지 위성 관측이 이루어진 격자 단위를 대상으로, 대기 중 암모니아 농도의 시·공간적 분포 특성을 체계적으로 정리하고, 관련 기초자료를 구축하는 데 초점을 두고 있음. 이를 통해 국내 암모니아 오염의 분포와 변동 특성을 명확하게 파악하고자 함.

1) 농업(84%) 외에는 생산공정(8%), 에너지산업 연소(1%), 비산업 연소(0.63%) 등이 뒤를 이음. 기후 에너지환경부 국가미세먼지정보센터 누리집(www.air.go.kr), 검색일: 2025. 9. 17. 참고.

2) 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 누리집(www.air.go.kr), 검색일: 2025. 9. 17. 참고.

- 본 연구의 목적은 위성 관측자료와 국내 축산농가 자료를 결합하여, 불균형 패널데이터를 구축하고, 축산업(축종별 사육두수, 사육밀도)과 암모니아 간의 상관관계를 실증적으로 규명함으로써 축산환경 개선 및 대기오염 저감을 위한 정책적 시사점을 도출하고자 함.
- 연구 목적 달성을 위해 다음과 같은 내용으로 구체화하였음. ① 국내 축산업 활동과 대기오염물질 배출현황, ② 암모니아 배출량 및 농도의 시·공간적 분포 특성, ③ 축산업과 평균 암모니아 농도 초과 일수 간의 상관분석, ④ 축산업 부문의 대기환경 관리 및 정책적 시사점 도출

2. 연구내용 및 방법

2.1. 연구내용

- 국내 축산업 및 축산환경 현황
 - 국내 축산업 현황
 - 축종별 사육두수 및 농가 수 변화
 - 국내 축산환경 현황
 - 축산환경의 정의 및 규제 현황
- 국내외 축산업의 대기오염물질(암모니아 등) 배출현황 및 관련 정책
 - 국내 축산업의 대기오염물질 배출현황
 - 국내 대기오염물질 배출 총량과 농업(축산) 부문 배출량

- 국외 축산업의 대기오염물질 배출현황
 - 국외 암모니아 배출 총량과 농업(축산) 부문 배출량
 - 국내외 축산업 관련 대기오염물질 배출 규제정책
- 축산업과 암모니아 농도의 실증분석
- 축산활동 및 암모니아의 시·공간적 분포
 - 축산활동과 암모니아 농도의 기초통계 및 사전 분석
 - 축산활동과 암모니아의 상관분석
 - 축산업의 암모니아 배출량과 추정치 비교·분석
- 축산부문의 암모니아 배출관리 및 정책과제
- 상관분석 결과를 활용한 축산부문의 암모니아 배출관리
 - 향후 대기질 관리와 연계한 축산업 암모니아 관리의 필요성

2.2. 연구방법

- 문헌조사 및 통계자료 검토
- 국내외 축산업 현황 및 대기오염물질(암모니아 등) 배출 동향
 - 국내외 축산업으로 인한 환경문제 발생 현황(대기오염, 악취 등)
 - 관련 정책 및 제도 현황 검토
- 통계 자료 분석
- 축산농가의 세부 자료(GIS 위치 정보, 축종별 사육두수 등)를 활용함.

- 암모니아 농도는 NASA의 JPSS-1(NOAA-20) 위성의 CrIS(Cross-track Infrared Sounder) 장비를 통해 관측한 데이터를 활용함. 위성 관측데이터는 각 픽셀(14km×14km)에서의 공기 기둥(Column) 안에 들어 있는 암모니아 분자의 총량을 건조공기 총량으로 나눈 농도(ppbv) 값을 활용하였음.
- 기상 데이터는 기상청 기상자료개방포털의 종관기상관측(ASOS)과 방재기상관측(AWS) 데이터를 사용하여 기상 요인(기온, 강수 등)을 설명변수로 포함함. 또한, 가축분뇨 공공 처리시설의 위치, 개수, 처리용량을 분석에 추가함.
- 회귀분석(Regression Analysis)을 활용하여 축산활동 변수와 평균 암모니아 농도 초과 일수 간의 관계 정도를 분석함.

3. 선행연구 검토 및 차별성

3.1. 선행연구

- 축산업과 축산환경(대기, 수질, 토양 등)을 연구한 선행연구는 상대적으로 많지만, 대기오염물질, 특히 전국을 대상으로 한 암모니아의 실측데이터를 가지고 축산활동과의 관계를 정량 분석한 국내연구는 상대적으로 제한적임.
- 이용건 외(2023)에서는 탄소중립을 위한 가축 사육단계의 온실가스 감축 기술과 정책을 검토하고, 감축 기술에 대한 축산농가의 인식조사 및 효과분석을 통해 축산부문의 온실가스 감축과 발전 방향을 제시하였음.

- 축산부문의 온실가스는 축산농가의 규모화로 매년 배출량이 증가하는 것으로 분석되었으며, 인식조사를 통하여 축종별 온실가스 배출감소의 필요성을 확인하였음. 또한, CGE 모형을 활용하여 축산부문의 생산성 향상이 온실가스 배출량을 감소시키는 것으로 분석되었음.
- 정민국 외(2021)는 축산업이 환경에 미치는 영향을 분석하고, 국내외 축산환경문제 및 관련 정책을 종합적으로 조사하여, 지속 가능한 축산업을 위한 개선방안과 정책과제를 제시하였음.
- 축산업의 성장과 함께 온실가스 배출 등 다양한 환경문제 발생에 대한 현황을 제시하였으며, 축산환경 문제에 대한 인식조사를 통해 축산농가와 일반국민의 의식 차이를 확인하였으며, 개선의 필요성을 강조하였음. 또한, 축산업의 환경영향 분석을 통한 암모니아 배출량 및 축산악취비용을 산정하였음.
- Kim et al.(2024)은 보령지역의 대기오염물질(NO_2 , SO_2 , PM_{10} 등)의 현황을 파악하였으며, 미세먼지와 암모니아의 연관성 분석을 통해 축산지역의 대기오염 관리에 대한 필요성을 제시함.
- 축사 주변의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 측정하여 암모늄 전환율(NHR)을 분석한 결과, $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 높을수록 NHR이 증가하는 것을 확인하였음. 또한, 암모니아의 2차 생성 미세먼지 기여율 정도를 타 연구 결과와 비교하였음.
- Rho et al.(2021)는 개방형 축사에 적용 가능한 암모니아 배출량 산정 방법을 비교·분석하여, 개방형 계사의 암모니아 배출 특성을 규명하였음. 계종별 특성 및 개폐식 커튼의 사용 여부가 암모니아 농도에 미치는 영향뿐만 아니라 사육방식(밀폐식·개방식)과 사육 기간(연령)에 따른 암모니아 농도의 변화도 분석하였음.

- 암모니아 배출계수를 산정할 때, 이산화탄소(CO₂)의 농도 및 발생량을 함께 고려할 필요가 있음을 시사함.
- Shim et al.(2022)은 서울 수도권을 대상으로 미세먼지와 주요 전구물질 간의 상관관계를 통한 대기질 개선 정책 마련 연구를 시행하였음. 수도권을 대상으로 2015~2017년의 대기오염 자료를 분석하여, 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)와 전구물질 간의 상관계수를 비교하였으며, 암모니아(NH₃) 배출 저감이 초미세먼지 관리의 핵심 전략임을 강조함.
- 또한, 연구 분석 결과에서는 암모니아 배출을 규제·관리할 수 있는 정책적 수단이 국내 대기질 관리에 필요함을 시사함.
- Lunghi et al.(2024)은 이탈리아 롬바르디아 지역을 대상으로 소와 돼지 사육 마릿수와 대기오염(NH₃, PM₁₀) 농도 간의 상관관계를 분석하였음. 소와 돼지의 사육 마릿수가 증가하면 일별 암모니아와 미세먼지 농도가 증가한다는 것을 확인하였음.

3.2. 선행연구와의 차별성

- 기존 축산업 연구에서는 배출계수를 활용하여 암모니아 배출 또는 악취 발생의 사회적 비용을 산정함. 그러나 이것은 실제 대기 중 암모니아와의 관계를 직접 반영하기에는 한계가 있으며, 축산활동과 암모니아 간의 정(+), 부(-)의 관계를 분석하는 데 어려움이 있음. 또한, 암모니아 관련 연구는 단일 축사 또는 일부 지역에 한정하여 연구가 진행됨.

- 본 연구는 위성이 관측한 대기 중 암모니아 농도 값의 시·공간적 분포를 파악하고, 이를 축산농가의 데이터와 결합함으로써, 전국 단위에서 주요 변수 간의 상관관계를 분석하는 데 차별성이 있음.
 - 특히 축산부문과 암모니아의 관계를 실증 분석한 결과를 토대로 축산환경 및 대기질 관련 정책에 대한 시사점을 제시한다는 점에서 기존 연구와 차별성이 있음.

- 또한, 기상 요인(기온, 강수 등)과 다른 축산업 변수로서 가축분뇨 공공 처리 시설 변수(개수 또는 처리용량)를 분석모형에 포함하여, 암모니아와 축산활동의 상관관계를 더욱 명확하게 분석할 수 있음. 또한, 위성 데이터의 격자 단위 자료를 활용하여 정밀한 공간적 패턴 분석을 가능하게 하며, 이는 기존의 행정구역 기반 연구의 공간적 분석을 보완할 수 있음.

2

국내 축산업과 축산환경 현황

1. 국내 축산업 현황

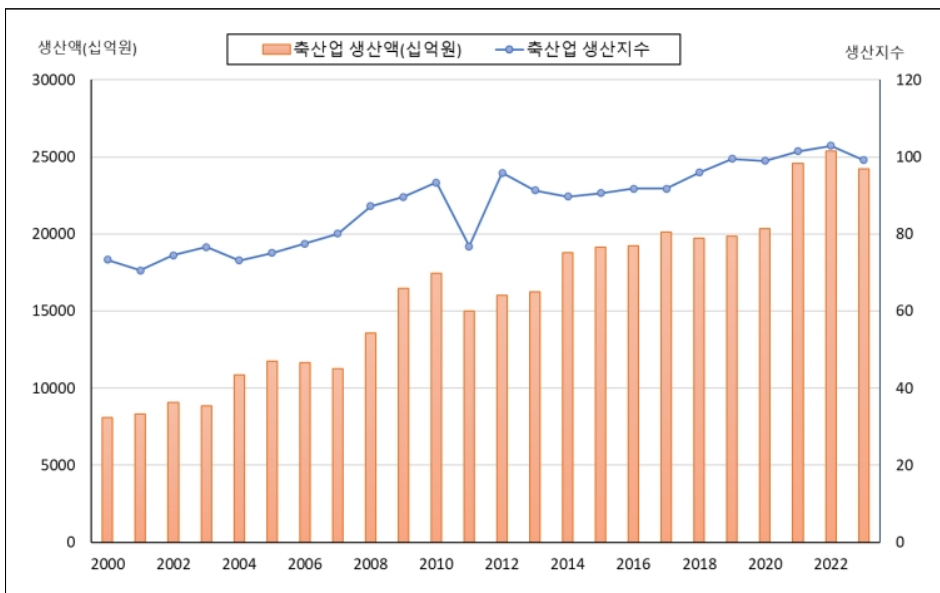
1.1. 국내 축산업 생산 동향

- 국내 축산업의 생산액은 지속적인 증가 추세를 보이며, 2023년에는 24조 2,000억 원으로 2000년(8조 820억 원)보다 약 3배 성장하였음. 이를 통해 축산업의 경제적 규모가 꾸준히 확대되었으며, 소득 증가, 축산물 생산 및 소비 확대 등의 복합적 결과로 볼 수 있음.³⁾
- 축산업의 생산지수는 기준연도(2020=100) 대비 생산량의 변화를 나타내며, 2010년 말에 발생한 구제역으로 큰 폭으로 감소하였지만, 장기적으로 지수는 우상향함. 즉, 생산활동 규모가 증가함을 의미함.

³⁾ 축산신문(2025. 9. 24.), "K-축산, 질적 도약 ... 지속가능 미래로".

- 2000년에서 2010년까지는 축산업 생산지수가 73.3에서 93.4까지 상승하였지만, 2010년 구제역 발생으로 생산량이 급감하여 76.8로 급락하였음. 이후 재입식이 진행되면서 2012년 이후 생산지수가 빠르게 회복되어 2021년, 2022년에는 기준연도를 초과하는 높은 생산 수준을 기록함. 최근에는 생산지수가 소폭 하락하였지만, 여전히 높은 수준을 유지함.

〈그림 2-1〉 국내 축산업 생산액 및 생산지수(2000~2023)



주 1) 농림업생산지수는 2020년 기준임.

2) 각 연도의 분기별 데이터를 평균한 값을 사용하였으며, 2025년은 3분기까지의 추정치를 포함함.

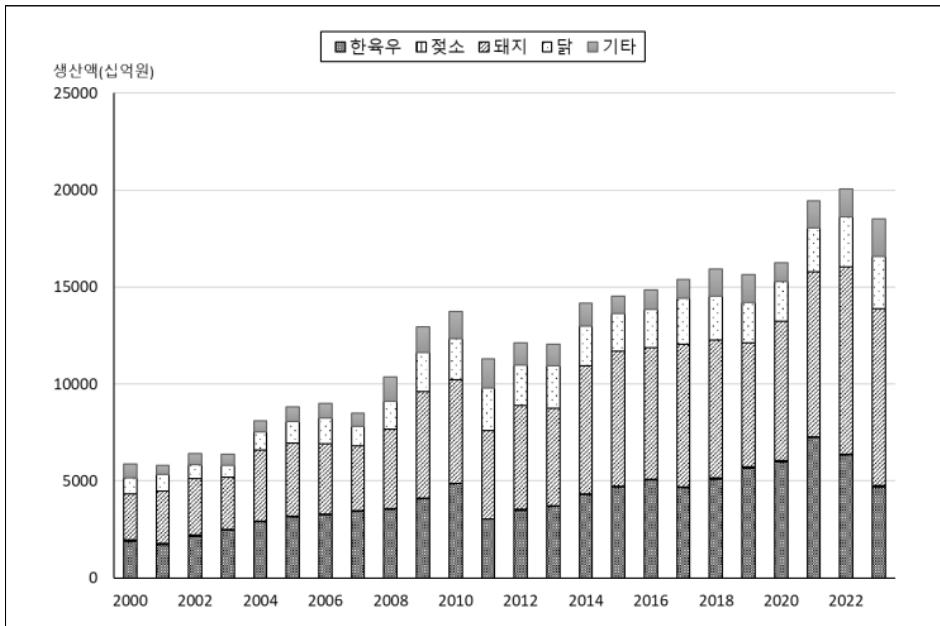
자료: 농림축산식품부(각 연도), 농림업생산지수.

○ 축산업 중 가축 부문의 생산액은 장기적으로 증가하는 추세를 보이며, 특히 한·육우, 닭, 돼지의 생산액이 전체 규모 확대를 주도하였음.

- 2000년 중반 이후 한·육우와 돼지의 생산액이 증가하였으며, 닭의 생산액이 2009년부터 뚜렷한 증가세를 보여주었음. 반면, 젓소와 기타 축종(염소, 토끼, 사슴, 오리 등)의 생산액은 전체 기간 동안 일정 수준을 유지하고 있음.

- 2017년부터는 가축 부문의 생산액이 15조 3,000억 원을 초과하였으며, 2022년에는 20조 500억 원까지 증가하였음. 최근에는 한·육우 부문의 생산액 감소로 가축 부문의 생산액이 소폭 감소하여 18조 5,000억 원을 기록하였음.

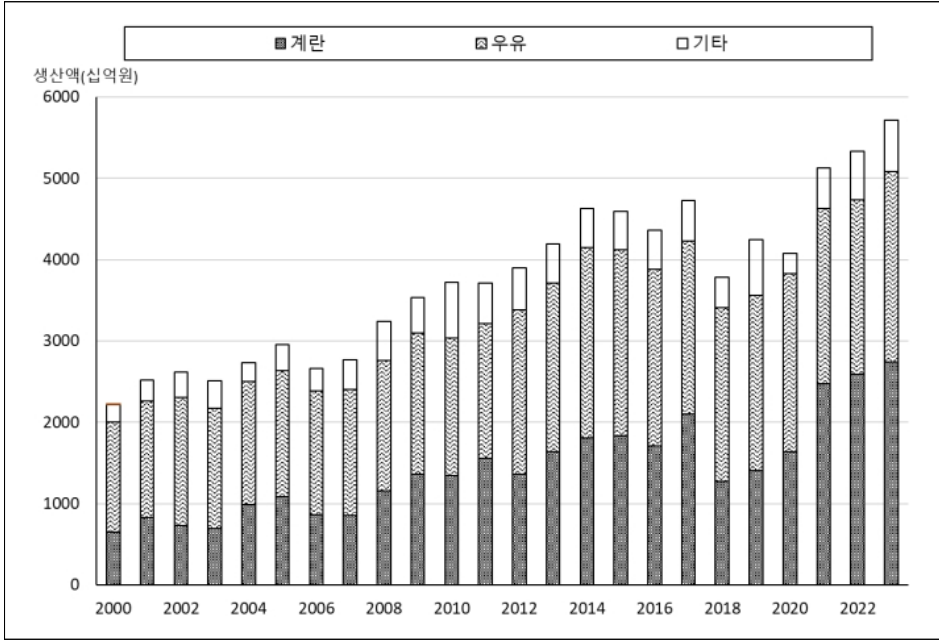
〈그림 2-2〉 축종별 연도별 생산액 추이(2000~2023)



자료: 농림축산식품부(각 연도), 농림업생산지수.

- 계란, 우유 등 축산물 생산액 또한 장기적으로 성장해 왔음. 2000년대 초반 약 2조 원 수준이던 축산물 생산액은 2010년대 중반에는 3조 원을 초과하였으며, 2023년에는 연중 최대인 약 5조 7,000억 원에 도달하였음.
- 축산물 생산액 중 우유는 2000년부터 2023년까지 꾸준히 높은 생산액을 차지하고 있으며, 2023년 생산액은 2000년 대비 1.7배 성장하여 2조 3,000억 원에 이르렀음. 또한, 계란 생산액은 2023년 2조 7,000억 원으로 2000년 대비 4.2배 이상 증가하였음.

〈그림 2-3〉 축산물별 연도별 생산액 추이(2000~2023)



자료: 농림축산식품부(각 연도), 농림업생산지수.

○ 국내 축산업은 2000년 이후 생산액과 생산지수가 모두 꾸준히 증가하며, 2023년에는 생산액이 약 24조 원 이상으로 확대되는 등 산업 구조가 크게 성장하였음.

- 특히 가축 부문과 축산 부산물·가공 부문에서의 생산액 증가가 두드러져, 한·육우, 돼지, 닭과 계란, 우유 등이 전체 축산업 성장의 핵심적인 동력으로 작용함.

○ 이러한 축산업의 성장은 축종별 사육 규모 및 구조 변화와 밀접하게 연관되며, 본 연구에서는 축산농가 및 주요 축종 현황을 통해 이를 살펴보고자 함.

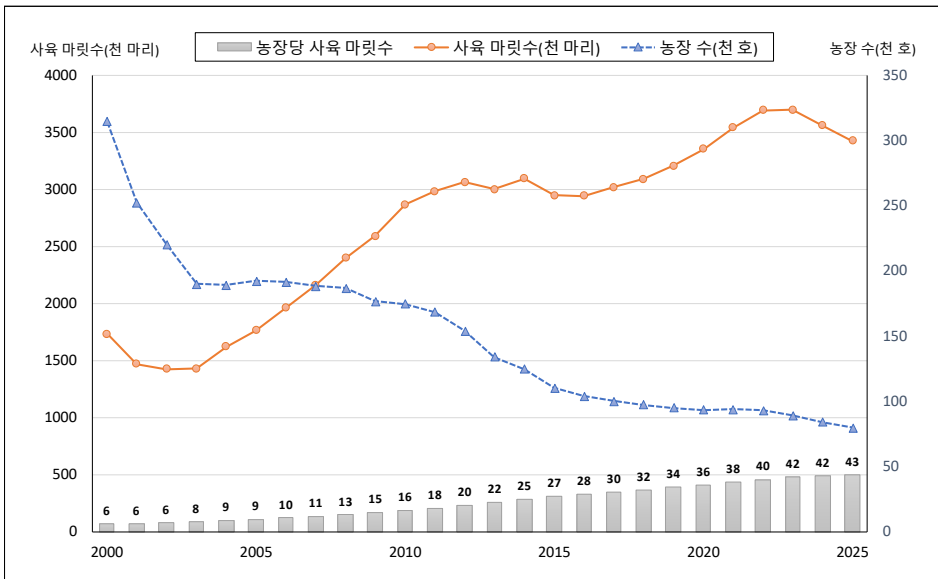
1.2. 국내 축종별 사육 동향

1.2.1. 한육·우

○ 국내 한육·우의 사육 마릿수는 2000년부터 꾸준히 증가하고 있으나, 농장 수는 지속해서 감소하고 있음. 한육·우의 농장당 사육 마릿수는 2000년부터 2025년까지 증가하여, 사육의 규모화가 지속되고 있음을 확인할 수 있음.

- 2025년에 총 사육 마릿수는 342만 마리로 2000년 대비 약 2배 증가하였으며, 한·육우를 사육하는 농장 수는 7만 9,000호까지 감소하여 2000년 대비 약 75% 감소하였음. 한육·우의 농장당 사육 마릿수는 6마리(2000년)에서 2025년 43마리로 약 7배 증가하였음.

〈그림 2-4〉 한육우 농가 구조 및 사육 규모 변화(2000~2025)



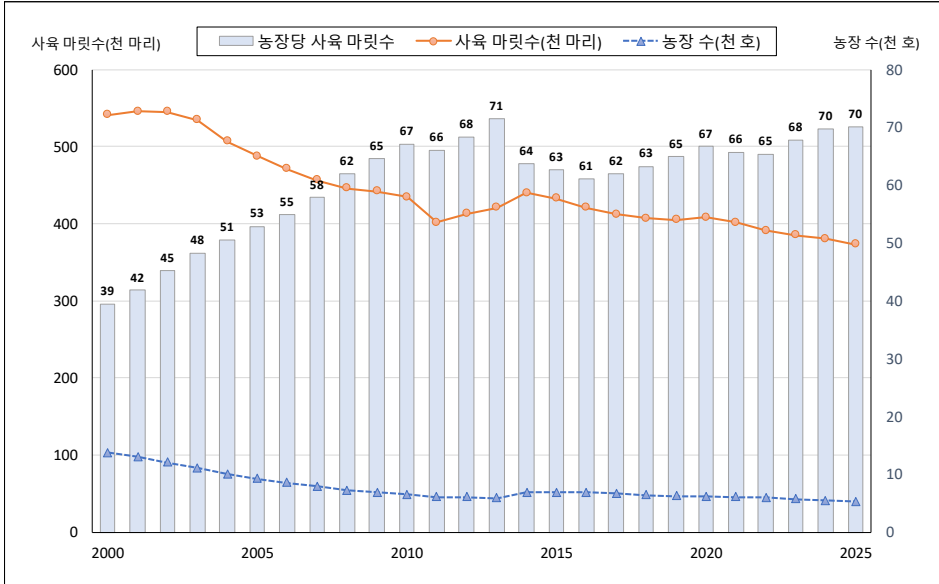
주: 각 연도의 분기별 데이터를 평균한 값을 사용하였으며, 2025년은 3분기까지의 추정치를 포함함.
 자료: 국가데이터처(각 연도), 가축동향조사.

1.2.2. 젖소

- 젖소 사육 농장 수는 전반적으로 감소하는 추세를 보이며, 전체 젖소 사육 마릿수 또한 최근까지 감소하는 것으로 나타남.
 - 젖소를 사육하는 농장은 2000년부터 2004년까지 1만 호 이상을 유지하였으나, 이후 2005년부터 9,000호에서 2025년에는 5,000호까지 감소하여 2000년 대비 약 61% 감소함.
 - 젖소 사육 마릿수는 2000년 54만 마리에서 2011년 40만 마리까지 꾸준히 감소한 뒤, 3년간(2012~2014) 소폭 증가하였으나 다시 감소하여 2025년에는 37만 마리를 기록함.
 - 한·육우의 추세와 달리 젖소 부문은 농장 수와 사육 마릿수 모두 감소하는 추세를 보임.

- 젖소를 사육하는 농장당 사육 마릿수는 2013년까지 증가하였지만 2014년에 큰 폭으로 감소하였음. 이후 지속적인 사육 마릿수의 감소로 인해 이전 수준의 값을 회복한 것으로 나타남. 젖소 부문 또한 사육의 규모화가 진행되고 있는 것으로 보임.
 - 농장당 젖소 사육 마릿수는 2013년 71마리까지 꾸준히 증가하였음. 2014년 젖소 농장당 사육 마릿수 64마리를 시작으로 젖소 농장 수의 큰 변동 없이, 사육 마릿수 감소로 2025년 농장당 사육 마릿수가 70마리까지 상승함.

〈그림 2-5〉 젓소 농가 구조 및 사육 규모 변화(2000~2025)



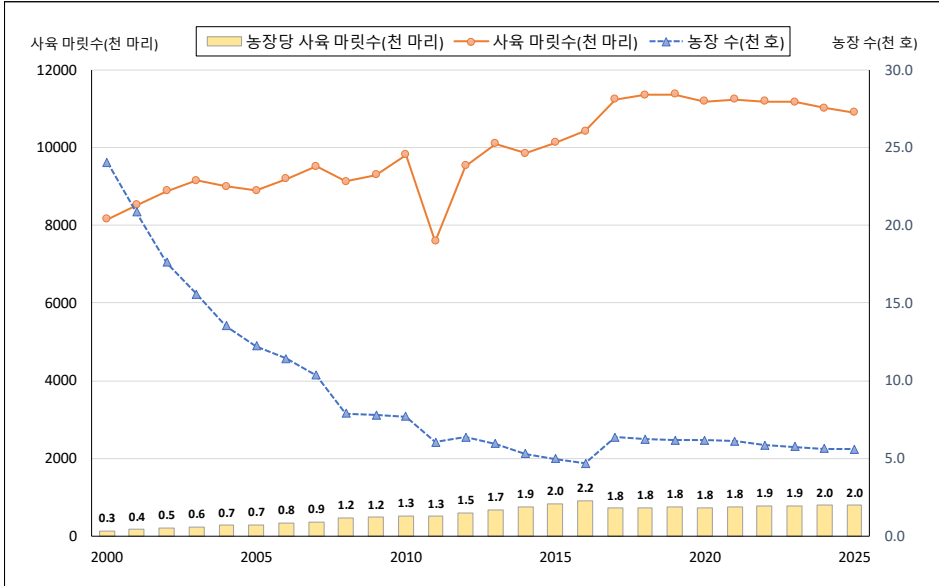
주: 각 연도의 분기별 데이터를 평균한 값을 사용하였으며, 2025년은 3분기까지의 추정치를 포함함.
 자료: 국가데이터처(각 연도), 가축동향조사.

1.2.3. 돼지

○ 돼지를 사육하는 농장 수는 지속해서 감소하는 추세를 보이는 반면, 돼지 사육 마릿수는 전체적으로 증가하는 추세를 보이고 있음.

- 돼지 농장 수는 2000년 2만 4,000호에서 2016년 5,000호까지 감소하여 2000년 대비 약 81% 감소하였음. 돼지 사육 마릿수는 국내 구제역의 영향으로 2011년에 큰 폭으로 감소하였으나, 이후 꾸준히 증가하여 2025년에는 1,091만 마리에 달하였음.

〈그림 2-6〉 돼지 농가 구조 및 사육 규모 변화(2000~2025)



주: 각 연도의 분기별 데이터를 평균한 값을 사용하였으며, 2025년은 3분기까지의 추정치를 포함함.
 자료: 국가데이터처(각 연도), 가축동향조사.

○ 한 농장에서 평균적으로 사육하는 돼지 마릿수는 지속해서 증가하고 있으며, 이를 통해 돼지 산업이 규모화된 구조로 변화하고 있음을 알 수 있음.

- 2000년 초반에는 농장당 돼지 사육 마릿수가 300마리 수준이었으나, 농가 수의 급격한 감소로 2008년 이후에는 농장당 약 1,000마리 이상의 돼지를 사육하는 것으로 나타남. 2025년에는 농장당 2,000마리의 돼지를 사육함으로써 사육의 규모화가 진행됨.

1.2.4. 닭(산란계, 육용계)

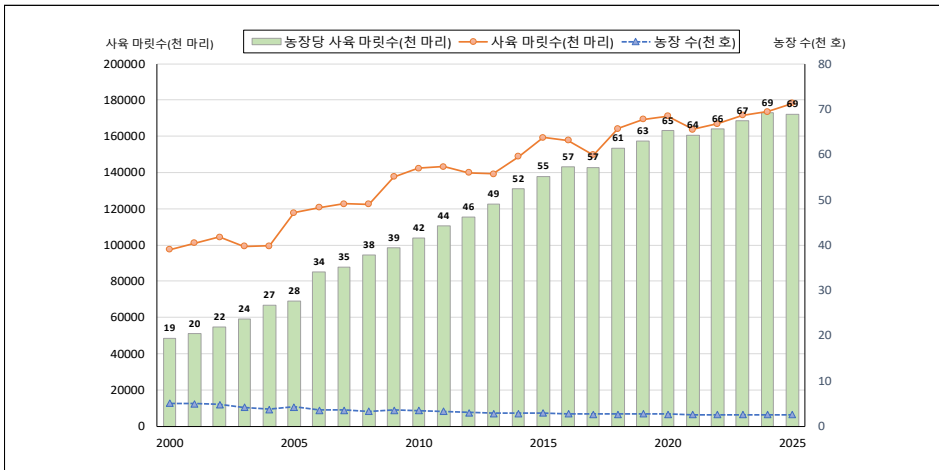
○ 닭 사육 동향을 살펴보면, 전체 닭 사육 농가 수는 감소하고 있지만, 2017년 이후에는 약 2,600만 농가로 일정한 수준을 유지하고 있음. 이에 반해, 닭 사육 마릿수는 지속해서 증가하는 추세를 보이고 있음.

- 2025년 닭 사육 농가 수는 2,500호를 기록했으며, 이는 2000년 5,000호 대비 약 49% 감소한 것으로 나타남. 반면, 닭 사육 마릿수는 2000년 9,700만 마리에서 2025년 1억 7,000만 마리까지 증가하여 약 83% 증가한 것으로 나타남.

○ 농장당 닭 사육 마릿수는 사육 마릿수 증가와 농장 수 정체로 지속해서 증가하는 추세임. 즉, 소수의 농가가 많은 마릿수를 사육하는 형태로 규모화가 빠르게 진행되고 있음.

- 농장당 사육 마릿수는 2000년 1만 9,000마리에서 시작하여 매년 증가하여 2025년에는 6만 9,000마리에 도달하였음. 이는 2000년 자료와 비교하여 농장 수 감소(-49%)와 사육 마릿수 증가(+83%)로 인해 농장당 사육 마릿수도 3.6배 증가한 결과임. 이를 통해 닭 사육 산업이 규모화, 전업화, 계열화 방향으로 변화하고 있음을 보여줌.

〈그림 2-7〉 닭(산란계, 육용계) 농가 구조 및 사육 규모 변화(2000~2025)



주 1) 이용건(2022)의 축사시설 실태조사 분석 연구를 준용하여 최신 자료로 재작성함.
 2) 각 연도의 분기별 데이터를 평균한 값을 사용하였으며, 2025년은 3분기까지의 추정치를 포함함.
 3) 닭의 사육 마릿수 및 농장 수는 산란계와 육용계 자료를 합산하여 산정한 값임.
 자료: 국가데이터처(각 연도), 가축동향조사.

2. 국내 축산환경 현황

2.1. 축산환경 정의 및 범위

- 축산환경은 「축산법」 제2조 제10의2에 따라 축산업 과정에서 발생하는 요소들이 사람과 가축에 영향을 미치는 환경 또는 상태를 의미함.
 - 즉, 축산환경은 축산업의 규모(사육 마릿수, 사육밀도), 가축 분뇨처리 방식, 입지 여건 등에 따라 환경에 미치는 영향의 정도가 다르며, 이를 적절히 관리하지 않으면 환경오염 문제로 이어질 수 있음.

- 「환경정책기본법」 제3조에 따르면, 환경오염은 사업 활동 및 인간의 활동으로 인해 발생하는 대기오염, 수질오염, 토양오염, 해양오염 등으로서 사람의 건강이나 환경에 피해를 주는 상태로 정의됨.
 - 이러한 관점에서 환경오염은 발생원에서의 오염물질 배출로 인해 자연환경 파괴 및 생활환경 피해가 발생하는 상태로 정의되며, 축산업 활동 또한 환경오염의 주요 원인이 됨.

- 축산업의 환경문제는 축산업 활동 과정에서 환경오염을 유발하는 직·간접적 발생원으로 인해 발생함. 축산업으로 인한 환경오염 유형과 주요 발생원을 다음과 같이 구분할 수 있음.

- <표 2-1>은 축산업에서 발생하는 환경오염의 유형을 정리한 것임. 축산업으로 인한 환경오염은 주요 환경매체인 대기·수질·토양오염을 중심으로 나타나며, 가축 사육과정과 가축분뇨의 발생·저장·처리 과정이 주요 발생원임.
 - 축산업에서의 대기오염은 가축 사육과정과 가축분뇨 처리과정에서 암모니

아(NH₃)와 황화수소(H₂S) 등 대기오염물질을 배출함. 수질오염은 가축분뇨 및 액비 유출, 축사의 세척수가 하천과 지하수로 유입되며, 부영양화 등 수질 악화를 초래함. 또한, 퇴·액비의 과다 살포와 가축분뇨의 장기간 처리·축적으로 토양의 질적 저하를 유발함.

○ 축산업의 환경문제 중에서도 악취오염과 온실가스 오염은 정책적으로 중요한 관리대상으로 인식되고 있음.

- 악취오염은 축사와 가축분뇨를 처리하는 과정에서 발생한 악취물질이 주민의 생활환경에 불편을 초래하고, 지역갈등과 민원의 주요 원인으로 작용함. 또한, 반추 가축의 장내 발효와 가축분뇨에서 발생하는 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)는 대표적인 온실가스로서, 기후변화 대응과 탄소중립 목표 달성을 위한 핵심 관리대상임.

〈표 2-1〉 축산업의 환경오염

환경오염 유형	주요 발생원	주요 특성
대기오염	- 가축 사육과정 - 가축분뇨의 발생·처리 과정	- 암모니아(NH ₃), 황화수소(H ₂ S) 등 대기오염물질 배출
수질오염	- 가축분뇨 및 액비 유출 - 축사의 세척수 및 강우 시 비점오염	- 하천·지하수 오염, 영양염류 유입에 따른 부영양화
토양오염	- 퇴비, 액비의 과다 살포 - 가축분뇨의 장기간 처리·축적	- 질소·인 축적, 염류 집적 등 토양 환경 악화
악취오염	- 축사 및 가축 사육 시설 - 가축분뇨의 저장·처리 과정	- 주민 생활환경 불편 초래 및 민원 발생
온실가스 배출	- 반추 가축의 장내 발효 - 가축분뇨의 저장·처리 과정	- 메탄(CH ₄), 아산화질소(N ₂ O) 배출에 따른 국가 온실가스 배출량 증가

자료: 저자 작성.

○ 최근 축산부문에서는 메탄(CH₄)과 암모니아(NH₃) 등 주요 온실가스 및 대기오염물질을 감축하는 것이 중요한 과제로 주목받고 있음. 특히 축산업의 지속적인 성장에 따라 지역주민과의 갈등을 유발하는 악취 민원이 증가하고 있어, 암모니아 배출에 대한 분석과 관리의 필요성이 커지고 있음.

2.2. 국내 축산환경 관련 법규 및 정책

- 축산업은 온실가스, 대기오염물질, 악취, 수질오염, 토양오염 등 다양한 환경문제를 동시에 유발하는 산업으로서 오염 유형에 따라 적용되는 규제 법령과 정책 수단이 상이함. <표 2-2>는 축산업에서 발생하는 주요 환경문제를 오염 유형별로 구분하고, 이에 대응하는 관련 법규 및 정책과 소관 부처를 정리한 것임.

- 축산부문에 발생하는 온실가스는 국가 차원의 기후위기 대응 및 탄소중립 달성과 직결되는 사안으로 「탄소중립기본법」을 중심으로 관리되고 있음.
 - 축산업은 가축의 장내발효 및 분뇨관리·처리 과정에서 다량의 온실가스를 배출하는 특성을 지니고 있어, 해당 법은 축산부문의 온실가스 감축 목표 설정과 정책 이행의 기본 틀을 제공함.

- 또한, 축산업에서 배출되는 암모니아는 대기환경과 생활환경과 밀접하게 연관된 물질이며, 「대기환경보전법」과 「악취방지법」을 통해 규제되고 있음.
 - 암모니아는 대기 중 다른 물질과 반응하여 초미세먼지(PM_{2.5})를 생성하는 전구물질인 동시에 축산시설 주변 지역의 악취 민원을 유발하는 주요 원인 물질임. 악취실태조사 시행, 암모니아 배출허용기준 설정 등을 통해 악취 발생을 방지함.

- 마지막으로, 축산분뇨로 인한 수질오염과 토양의 양분 과잉 문제는 「가축분뇨법」을 중심으로 관리되고 있음. 가축분뇨의 저장·처리·이용 과정에서의 방류수 수질을 규제하거나 퇴·액비 살포 기준 등을 설정하여 수질 및 토양오염을 예방함.

〈표 2-2〉 축산업의 환경오염 문제와 규제정책

축산업의 환경오염	법규 및 정책	소관부처
온실가스 (아산화탄소, 메탄, 아산화질소 등)	기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 (탄소중립기본법)	기후에너지환경부
대기오염(암모니아 등)	대기환경보전법	기후에너지환경부
악취(암모니아 등)	악취방지법	기후에너지환경부
수질오염	가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 (가축분뇨법)	기후에너지환경부
토양오염(양분 과잉)		기후에너지환경부

자료: 정민국(2021).

- 최근 축산환경개선대책에서는 2035 국가 온실가스감축목표(NDC) 달성과 연계하여, 축산부문에서는 저메탄 사료 공급으로 메탄(CH₄) 배출 및 축산악취 유발물질(암모니아(NH₃)) 감소를 중요한 과제로 부각함.
- 최근 탄소중립목표 달성을 위한 축산부문에서는 메탄과 암모니아 감축을 위해서 노력하고 있음. 가축분뇨를 저장, 처리, 자원화하는 과정에서 메탄(CH₄) 과 아산화질소(N₂O) 배출에 영향을 미치며, 동시에 암모니아(NH₃)의 주요 배출경로로 작용함. 이는 가축분뇨관리는 온실가스 감축과 암모니아 저감을 상호연계된 정책 대상으로 고려되어야 함을 시사함.
- 또한, 축산업의 지속적인 성장으로 인해 발생하는 여러 문제 중 지역주민과 직접 갈등을 겪고 있는 악취 민원으로 본 연구는 암모니아와 축산업과의 관계를 분석하고자 함.

3

국내외 축산업 대기오염물질 배출현황 및 정책

1. 국내 현황

1.1. 국내 대기오염물질 배출현황

○ 국내에서 배출되는 대기오염물질은 초미세먼지(PM_{2.5}), 미세먼지(PM₁₀), 총부유먼지(TSP) 등 공기 중 고체 또는 액체 미립자 형태로 존재하는 오염물질과 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOCs), 암모니아(NH₃), 일산화탄소(CO) 등 기체 상태의 가스형 오염물질이 포함됨.

- 대부분의 대기오염물질은 점·면·이동오염원 등 배출원에서 직접 대기로 배출되거나 다른 물질이 대기 중 화학반응을 거쳐 2차 오염물질이 생성되는 경우도 존재함.

○ <표 3-1>은 2010년부터 2023년까지의 국내 주요 대기오염물질의 연도별 배출량 추이를 제시한 것임. 중·장기적으로 다수의 오염물질 배출량이 감소 추세를 나타내고 있으며, 물질별로 감소하는 속도와 변동 양상이 상이함.

- 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 2011년 8만 2,000톤에서 2023년 4만 2,000톤으로 약 41.4% 감소한 것으로 나타남. 이는 초미세먼지 저감을 위한 정책적 관리의 성과가 일정 부분 반영된 것으로 판단됨.

〈표 3-1〉 국내 연도별 대기오염물질 배출량(2010~2023)

단위: 천 톤

구분	PM _{2.5}	SOx	NOx	VOCs	NH ₃	CO	TSP	PM ₁₀	BC
2010	-	402	1,061	866	290	766	178	117	-
2011	82	434	1,040	873	276	718	202	131	-
2012	76	418	1,075	911	303	704	183	120	-
2013	77	405	1,091	914	293	697	186	122	-
2014	63	343	1,136	906	293	594	147	98	13
2015	99	352	1,158	1,011	297	793	604	233	16
2016	70	313	1,269	1,036	258	841	404	165	17
2017	67	279	1,211	1,044	261	836	406	163	16
2018	67	257	1,145	1,023	270	802	414	166	16
2019	62	237	1,045	1,011	269	753	394	152	14
2020	59	180	929	991	261	711	392	147	12
2021	57	161	884	1,003	262	695	396	146	11
2022	59	127	857	938	242	922	385	148	11
2023	48	126	808	899	243	803	341	119	9

주 1) 초미세먼지(PM_{2.5})는 2011년, BC(Black Carbon)는 2014년부터 배출량을 산정함.

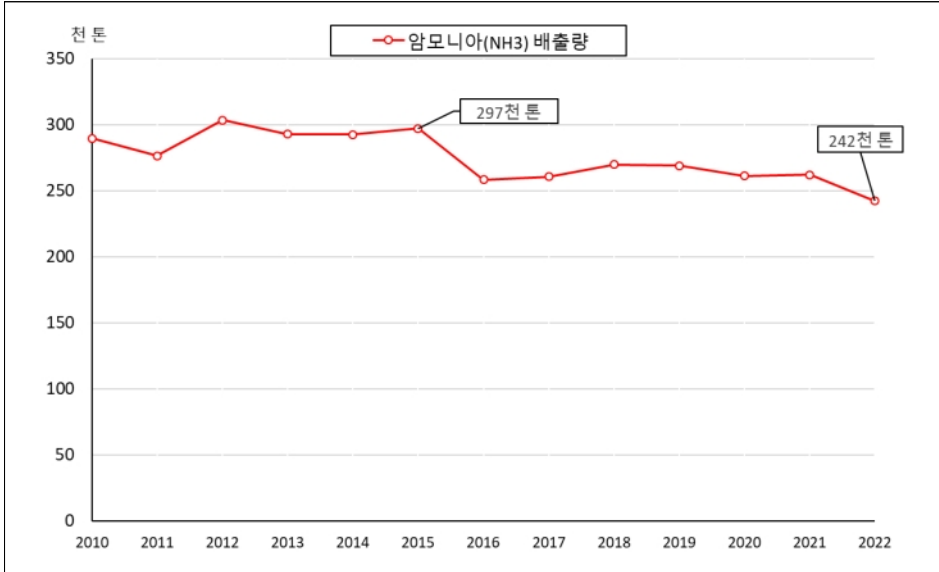
2) 2015년부터 비산먼지 및 생물성 연소 부문을 배출량에 포함함.

자료: 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터(검색일: 2025. 12. 31.).

○ 특히 암모니아(NH₃)는 악취 유발물질 및 초미세먼지(PM_{2.5})의 주요 전구물질로 국민 건강 및 대기질 측면에서 중요한 관리 대상으로 평가됨. 암모니아 배출량은 전 기간에 걸쳐 24만 톤에서 30만 톤 내외의 수준에서 변동함. 이는 장기적으로 뚜렷한 감소 추세보다는 다소 정체된 양상을 보이고 있음.

- NH₃ 배출량은 2010년 29만 톤에서 2012년 30만 톤까지 증가한 이후, 2015년부터 26만 톤과 30만 톤 수준에서 등락을 반복함. 이후 2020년부터는 26만 톤 내외에서 소폭 감소하였으며, 2023년에는 24만 톤을 배출하여 감소 폭은 제한적인 것으로 나타남.

〈그림 3-1〉 연도별 암모니아(NH₃) 배출량 변화



자료: 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터(검색일: 2025. 12. 31.).

○ 국내 암모니아(NH₃) 배출량을 배출원별로 구분하여 살펴보면, 2010년부터 2022년까지 농업부문은 암모니아 배출의 절대적인 비중을 차지하고 있으며, 전체 배출량 대비 약 74.5%에서 83.6% 수준으로 가장 큰 비중을 지속해서 유지하고 있음. 따라서 암모니아 배출 구조를 정확하게 파악하기 위해서는 전체 배출의 대부분을 차지하는 농업부문을 중심으로 배출 특성 및 발생 요인을 살펴볼 필요가 있음.

- 반면, 에너지산업, 비산업 연소, 제조업 부문에서 배출하는 암모니아는 전체 배출량 대비 각각 1% 이하로 미미한 수준에 머물러 있음. 또한, 생산공정 및 이동오염원, 기타 부문은 10% 내외 또는 그 이하로 상대적으로 낮은 수준의 암모니아를 배출함.

〈표 3-2〉 국내 배출원별 암모니아 배출량(2010~2022)

단위: 천 톤

구분	에너지산업	비산업	제조업	생산공정	이동오염원	농업	기타	합계
2010	1.4 (0.5)	1.6 (0.6)	0.9 (0.3)	32.8 (11.3)	9.9 (3.4)	230.6 (79.6)	12.7 (4.4)	290 (100.0)
2011	1.5 (0.5)	1.5 (0.6)	0.9 (0.3)	33.5 (12.1)	9.9 (3.6)	216.5 (78.3)	12.7 (4.6)	276 (100.0)
2012	1.6 (0.5)	1.5 (0.5)	0.8 (0.3)	38.0 (12.5)	9.9 (3.2)	239.0 (78.7)	12.8 (4.2)	303 (100.0)
2013	1.7 (0.6)	1.4 (0.5)	0.8 (0.3)	35.1 (12.0)	10.1 (3.4)	231.1 (78.9)	12.8 (4.4)	293 (100.0)
2014	1.4 (0.5)	1.3 (0.4)	0.7 (0.2)	38.0 (13.0)	10.2 (3.5)	228.0 (77.9)	12.9 (4.4)	293 (100.0)
2015	1.4 (0.5)	1.4 (0.5)	0.6 (0.2)	39.4 (13.3)	10.2 (3.4)	231.3 (77.8)	12.9 (4.3)	297 (100.0)
2016	2.0 (0.8)	1.5 (0.6)	1.0 (0.4)	43.0 (16.6)	5.2 (2.0)	192.7 (74.6)	13.0 (5.0)	258 (100.0)
2017	1.9 (0.7)	1.5 (0.6)	1.0 (0.4)	44.5 (17.0)	4.6 (1.8)	194.3 (74.5)	13.0 (5.0)	261 (100.0)
2018	2.3 (0.8)	1.5 (0.6)	1.1 (0.4)	46.0 (17.0)	3.5 (1.3)	202.5 (75.0)	13.0 (4.8)	270 (100.0)
2019	2.1 (0.8)	1.6 (0.6)	1.1 (0.4)	44.7 (16.6)	2.7 (1.0)	203.8 (75.8)	13.0 (4.8)	269 (100.0)
2020	2.1 (0.8)	1.6 (0.6)	1.1 (0.4)	41.1 (15.7)	2.2 (0.8)	200.1 (76.6)	13.0 (5.0)	261 (100.0)
2021	2.2 (0.8)	1.6 (0.6)	1.1 (0.4)	42.0 (16.0)	1.8 (0.7)	200.4 (76.5)	12.9 (4.9)	262 (100.0)
2022	2.5 (1.0)	1.5 (0.6)	1.4 (0.6)	19.7 (8.1)	1.7 (0.7)	202.4 (83.6)	12.9 (5.3)	242 (100.0)

주 1) ()는 전체 배출량 중 배출원별 배출량의 비중임.

2) 이동오염원 배출량은 도로와 비도로이동오염원 배출량의 합임.

3) 기타 배출원은 폐기물 처리, 기타 먼오염원, 생물성연소를 포함하였음.

자료: 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터(검색일: 2026. 1. 5.).

1.2. 축산부문의 암모니아 배출현황

○ 국내 농업부문에서 발생하는 암모니아(NH₃) 배출은 배출원별로 크게 ‘분뇨관리’와 ‘비료 사용 농경지’로 구분됨. 특히 ‘분뇨관리’ 과정에서의 암모니아 배출량은 전체 농업부문에서 90% 수준을 유지하고 있음. 또한, 배출량은 2010년 약 20만 9,000톤에서 2023년 약 18만 6,000톤으로 감소하였지만, ‘분뇨관리’가 차지하는 비중은 90.9%에서 91.9%로 확대되었음.

- 반면, ‘비료 사용 농경지’에서 배출되는 암모니아는 2010년 2만 1,000톤에서 2023년 1만 6,500톤으로 감소하였으며, 농업부문에서 차지하는 비중 또한 9.1%에서 8.1%로 축소된 것으로 확인됨.

〈표 3-3〉 국내 농업부문 암모니아 배출량(2010~2023)

단위: 천 톤, %

구분	분뇨관리 (천 톤)	비료 사용 농경지 (천 톤)	농업부문 합계 (천 톤)	분뇨관리 비중(%)	비료 사용 농경지 비중(%)
2010	209.5	21.0	230.6	90.9	9.1
2011	194.7	21.8	216.5	89.9	10.1
2012	215.7	23.3	239.0	90.3	9.7
2013	209.4	21.7	231.1	90.6	9.4
2014	207.8	20.2	228.0	91.2	8.8
2015	211.4	19.9	231.3	91.4	8.6
2016	173.2	19.6	192.7	89.9	10.1
2017	176.6	17.8	194.3	90.9	9.1
2018	183.0	19.6	202.5	90.3	9.7
2019	185.0	18.8	203.8	90.8	9.2
2020	182.1	18.1	200.1	91.0	9.0
2021	181.6	18.8	200.4	90.6	9.4
2022	186.1	16.4	202.4	91.9	8.1
2023	186.9	16.5	203.4	91.9	8.1

주: CAPSS 자료의 배출량 통계자료를 활용하여 농업부문의 배출원중분류를 정리함.

자료: 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터(검색일: 2026. 1. 5.).

- 이를 통해 농업부문 내 암모니아 배출 구조가 축산업 중심으로 형성되고 있으며, 암모니아 배출 저감을 위해서는 가축 사육 및 가축분뇨의 저장·처리·이용 과정에서 발생하는 배출을 중심으로 한 관리·규제 및 기술적 대응이 필요함.
- <표 3-4>는 축종별 암모니아 배출계수를 나타낸 것으로, 가축 한 마리당 배출하는 암모니아의 양(kg NH₃/마리)을 의미함. 배출계수는 세부 축종과 성장 단계에 따라 다르게 나타나며, 대체로 사육 규모와 분뇨 발생량이 많은 축종에서 상대적으로 큰 값을 보여줌.
 - 젖소 또는 일반 소의 암모니아 배출계수는 마리당 10kg 이상의 암모니아를 배출하여 주요 축종 중 가장 높게 나타났으며, 다음으로는 돼지의 배출계수가 높게 나타남.

<표 3-4> 축종별 암모니아 배출계수

단위: kg NH₃/마리

구분	젖소	일반 소			돼지				
		1년 미만	1~2년	2년 이상	자돈	육성돈	비육돈	모돈	
배출계수	24.6	11.8	14.0	16.8	4.4	5.27	7.289	21.4	
구분	닭			기타 가금류			양 및 염소		
	산란계	육계	중계	오리	거위	칠면조	양	염소	
배출계수	0.37	0.06	가중평균	0.92	0.92	0.92	0.46	0.46	
구분	기제류			모피동물			기타		
	말	노새	나귀	밍크	여우	토끼	개	사슴	고양이
배출계수	5.1	5.1	5.1	1.69	1.69	1.69	2.5	1.1	0.83

주: 가중평균 닭-중계의 배출계수는 닭-산란계, 육계의 배출계수를 해당연도의 산란계, 육계 사육두수로 가중 평균하여 적용함.

자료: 기후에너지환경부(2025).

- <표 3-5>는 분뇨관리 부문에서 배출된 암모니아를 축종별로 구분하여 제시한 자료임. 이를 살펴보면, 축종별 배출 구조 또한 특정 축종에 집중되어 있으며, 돼지와 일반 소, 닭 부문의 배출량을 합산할 경우 전체 분뇨관리 배출량의

약 80% 이상을 차지하는 것으로 나타남. 특히 돼지는 약 40~45% 수준의 가장 높은 배출 비중을 유지하며, 분뇨관리 부문에서 핵심적인 배출원으로 확인됨.

- 일반 소의 경우, 2010년에는 암모니아 배출량의 20.2%를 차지하였으며, 이후 점차 비중이 확대되어 2023년에는 28.8%로 확대됨. 또한, 닭의 경우 암모니아 배출 비중이 20% 내외를 유지하면서 비교적 큰 비중을 차지함.

〈표 3-5〉 분뇨관리 부문 내 축종별 암모니아 배출량(2010~2023)

단위: 천 톤

구분	일반 소	젖소	돼지	닭	양 또는 염소	기타	합계
2010	42.4 (20.2)	10.6 (5.0)	93.6 (44.7)	44.6 (21.3)	0.1 (0.1)	18.2 (8.7)	209.5 (100.0)
2011	42.9 (22.0)	9.9 (5.1)	77.5 (39.8)	47.9 (24.6)	0.1 (0.1)	16.3 (8.4)	194.7 (100.0)
2012	44.3 (20.5)	10.3 (4.8)	93.1 (43.1)	47.0 (21.8)	0.1 (0.1)	20.9 (9.7)	215.7 (100.0)
2013	42.5 (20.3)	10.4 (5.0)	93.1 (44.4)	48.6 (23.2)	0.1 (0.1)	14.7 (7.0)	209.4 (100.0)
2014	40.2 (19.4)	10.6 (5.1)	94.9 (45.7)	50.3 (24.2)	0.1 (0.1)	11.6 (5.6)	207.8 (100.0)
2015	38.9 (18.4)	10.1 (4.8)	95.6 (45.2)	52.9 (25.0)	0.1 (0.1)	13.7 (6.5)	211.4 (100.0)
2016	42.8 (24.7)	10.4 (6.0)	74.1 (42.8)	33.4 (19.3)	0.2 (0.1)	12.3 (7.1)	173.2 (100.0)
2017	43.8 (24.8)	10.1 (5.7)	80.1 (45.4)	30.6 (17.4)	0.2 (0.1)	11.7 (6.6)	176.6 (100.0)
2018	44.8 (24.5)	10.0 (5.5)	80.7 (44.1)	34.3 (18.8)	0.3 (0.1)	12.9 (7.1)	183.0 (100.0)
2019	46.2 (25.0)	10.0 (5.4)	80.6 (43.6)	34.6 (18.7)	0.3 (0.1)	13.3 (7.2)	185.0 (100.0)
2020	48.5 (26.7)	10.0 (5.5)	79.1 (43.4)	35.4 (19.4)	0.2 (0.1)	8.7 (4.8)	182.1 (100.0)
2021	51.2 (28.2)	9.9 (5.4)	79.4 (43.8)	33.1 (18.2)	0.2 (0.1)	7.7 (4.3)	181.6 (100.0)
2022	53.6 (28.8)	9.6 (5.2)	79.0 (42.4)	35.0 (18.8)	0.2 (0.1)	8.7 (4.7)	186.1 (100.0)
2023	53.9 (28.8)	9.5 (5.1)	78.7 (42.1)	36.0 (19.3)	0.2 (0.1)	8.7 (4.6)	186.9 (100.0)

주 1) ()는 전체 축종의 배출량 중 축종별 배출량의 비중임.

2) 기타 축종은 기제류, 기타 가금류, 모피동물 등을 포함하였음.

자료: 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터(검색일: 2026. 1. 5.).

○ 분뇨관리 부문의 암모니아 배출량은 지역별 축산업 규모와 관련이 있어 보이며, 축산업 비중이 높은 경기도, 충남, 경북, 전북, 전남 등을 중심으로 상대적으로 높은 수준을 나타냄.

- 특히 경기도와 충남은 분뇨관리 측면에서 연간 약 3만 톤 내외의 암모니아를 배출하여 전국에서 가장 큰 비중을 차지함. 이는 해당 지역에 대규모 축산단지가 분포하고 가축 사육두수가 집중된 것을 반영함.
- 반면, 광역시 및 대도시 지역에서의 암모니아 배출량은 연간 1,000톤 이하로 상대적으로 배출량이 낮은 것을 확인할 수 있으며, 이는 축산업 활동이 제한되어 있거나, 비축산 지역의 비중이 높은 도시의 특성이 반영된 것으로 해석됨.

〈표 3-6〉 분뇨관리 부문 시도별 암모니아 배출량(2013~2023)

단위: 천 톤

시도	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
강원도	9.2	9.5	9.5	8.4	8.8	9.1	9.2	9.1	9.3	9.4	9.3
경기도	37.6	37.5	38.2	31.1	30.0	31.9	32.1	29.9	27.9	30.1	30.2
경남	18.7	18.9	19.0	16.2	17.3	17.5	17.9	17.9	18.2	18.1	18.2
경북	28.2	28.6	28.6	25.3	27.0	27.2	27.5	28.0	28.8	29.0	28.5
광주	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
대구	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	1.2
대전	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
부산	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
서울	0.7	0.6	0.7	0.5	0.5	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
세종	2.8	2.7	2.9	2.7	2.2	2.2	2.3	2.5	2.1	1.9	2.0
울산	1.1	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0
인천	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.2	0.5	0.6	0.7	0.7
전남	26.3	24.4	25.9	21.7	22.0	23.1	23.8	24.3	24.3	25.6	25.1
전북	26.8	27.0	27.2	20.5	21.0	22.0	22.0	22.0	22.1	22.4	22.6
제주	6.4	6.3	6.3	5.2	5.1	5.1	5.1	5.0	5.0	5.0	5.0
충남	33.8	34.2	34.7	27.0	28.0	29.7	29.6	29.8	30.0	30.0	30.6
충북	15.2	14.6	14.9	11.3	11.1	11.7	11.5	11.4	11.6	12.2	12.2

자료: 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터(검색일: 2026. 1. 5.).

○ 비료 사용 부문의 암모니아 배출량은 분뇨관리 부문과 비교하였을 때, 절대적인 배출량은 적지만, 농업 활동이 활발한 지역을 중심으로 높은 배출량을 보임. 전남, 전북, 충남, 경북 등 주요 농업지역에서 상대적으로 많은 암모니아를 배출함.

- 전남의 비료 사용 농경지에서 배출된 암모니아는 연간 3,800톤에서 4,600톤으로 나타났음. 이는 전국에서 가장 높은 배출량을 보여주었으며, 논·밭의 면적이 넓고 비료 사용이 많은 지역적 특성이 반영된 것으로 보임.
- 앞선 분뇨관리 부문의 암모니아 배출량과 같이, 대도시 및 광역시는 비료 사용 부문의 암모니아 배출량이 연간 100톤에서 200톤 수준으로 매우 낮게 나타났음. 이는 농경지 면적이 제한적인 특성이 반영된 것으로 해석되며, 암모니아 관리는 농촌 및 농업 중심지역을 대상으로 정책을 설계하는 것이 적절함을 시사함.

〈표 3-7〉 시도별 비료 사용 부문 암모니아 배출량(2013~2023)

단위: 천 톤

시도	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
강원도	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.2	1.3
경기도	1.7	1.7	1.8	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3
경남	1.9	1.8	1.7	1.8	1.6	1.8	1.8	1.6	1.7	1.4	1.4
경북	2.6	2.3	2.2	2.2	2.0	2.1	2.0	1.9	2.0	1.8	1.7
광주	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
대구	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
대전	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
부산	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
서울	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
세종	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
울산	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
인천	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
전남	4.6	4.3	4.3	4.0	3.8	4.5	4.3	4.1	4.3	3.8	3.8
전북	3.0	2.9	2.7	2.6	2.4	3.1	2.7	2.6	2.7	2.4	2.5
제주	1.0	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9
충남	3.0	2.7	2.7	2.7	2.2	2.3	2.3	2.2	2.2	2.0	2.0
충북	1.3	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8

자료: 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터(검색일: 2026. 1. 5).

1.3. 암모니아 관련 이슈 및 법률

1.3.1. 축산악취 문제

- 국내 암모니아(NH₃) 배출량은 축산업의 지속적인 성장과 밀접한 관련이 있으며, 축산농가의 빠른 규모화로 인해 축사 및 가축분뇨 등에서 발생하는 냄새 물질은 심각한 악취 문제를 유발함. 이는 주민의 생활환경에도 큰 영향을 미치므로 축산업이 해결해야 할 중요한 문제 중 하나임.
- <표 3-8>은 2014년부터 2023년까지 전체 민원건수(A)와 축산악취 민원건수(B)를 나타냄. 전체 민원건수는 2014년 약 1만 4,000건을 시작으로 2023년 약 3만 9,000건으로 장기간 꾸준히 증가하는 추세를 보임.
- 축산악취 민원은 2023년 기준 1만 4,600건으로 전체 민원건수 대비 37%로 높은 비중을 차지함. 이는 2014년 축산악취 민원비중(19.2%)보다 약 2배 이상 증가하였으며, 축산악취가 사회적 문제로 점차 확대되고 있음을 보여주며, 암모니아(NH₃)를 관리할 필요성이 제기됨.

<표 3-8> 국내 축산악취 민원 현황(2014~2023)

단위: 건

구분	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
전체 민원(A)	14,816	15,573	24,748	22,851	32,452	40,854	39,902	39,397	33,592	39,457
축산악취 민원(B)	2,838	4,323	6,398	6,112	6,705	12,631	14,354	13,616	13,656	14,600
비중 (B/A)	19.2	27.8	25.9	26.7	20.7	30.9	36.0	34.6	40.7	37.0

자료: 기후에너지환경부 홈페이지(검색일: 2025. 9. 22.); 축산경제신문(검색일: 2025. 9. 22.); 한돈뉴스(검색일: 2025. 9. 22.).

1.3.2. 대기환경보전법⁴⁾

- 대기환경보전법은 대기오염이 국민의 건강 및 환경에 위협되는 경우를 예방하고, 대기환경 수준을 적절히 유지하여 국민의 건강과 쾌적한 생활을 확보하는 것을 목적으로 함.
 - ‘대기오염물질’은 오염도, 독성, 배출량, 생태계 영향 등에 따라 대기오염을 초래하는 입자 또는 가스 형태의 대기 물질을 의미함.

- 대기오염으로 인한 국민의 건강, 생태계, 산업활동에 대한 위협을 최소화하기 위해서는 대기오염도를 예측하고 결과를 발표해야 함(「대기환경보전법」 제7조의2). 대기오염도가 환경기준(「환경정책기본법」 제12조)을 초과할 경우, 주민의 건강 또는 자연에 심각한 악영향을 줄 것으로 판단할 경우, 시·도지사는 대기오염 경보를 발령할 수 있음.
 - 축산업에서 발생하는 주요 대기오염물질은 가축 사육과정에서 발생하는 암모니아(NH_3)가 질소산화물과 반응하여 만들어진 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)와 분뇨에서 발생하는 아산화질소(N_2O)가 있음. 대기환경보전법에서는 아산화질소를 대표 온실가스 중 하나로 설정하여 오염도를 관리함.

- 대기오염 배출시설에서 배출허용기준(「대기환경보전법」 제16조, 제29조 제3항)을 초과한 경우, 기후에너지환경부장관 또는 시·도지사는 해당 사업자에게 배출허용기준을 준수하라는 조치를 명할 수 있음.
 - <표 3-9>에서는 농업과 관련된 시설에 대한 암모니아, 황산화물, 불소 화합물, 먼지의 배출허용기준을 보여주고 있음. 특히 암모니아는 화학비료 및 질소화합물 제조시설에 12ppm 이하, 유기질비료 제조시설에 30ppm 이하의 배출허용기준을 설정함.

⁴⁾ 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr>), 검색일: 2026. 2. 9.

〈표 3-9〉 농업 연관 시설의 배출허용기준

대기오염물질	배출시설	배출허용기준
암모니아(ppm)	- 화학비료 및 질소화합물 제조시설	12 이하
	- 유기질비료 제조시설	30 이하
황산화물(ppm)	- 화학비료 및 질소화합물 중 혼합·반응·정제·농축시설	90 이하
불소 화합물(ppm)	- 화학비료 및 질소화합물 제조시설, 복합비료 제조시설	3 이하
먼지(mg/Sm ³)	- 화학비료 및 질소화합물 소성시설, 건조시설	25(10) 이하

주 1) 2020년 1월 1일부터 적용되는 배출허용기준을 기준으로 작성함.

2) 배출허용기준란의 ()는 표준산소농도를 뜻함.

자료: 국가법령정보센터(검색일: 2026. 2. 9.), 대기환경보전법 시행규칙 [별표 8].

○ 대기오염으로 주민의 건강과 환경에 큰 피해가 우려될 경우, 개선명령을 이행하지 않은 배출시설 또는 사업자에게 조업정지, 조업시간 제한 등의 조치를 시행할 수 있음. 또한, 배출 부과금을 부과하거나 징수하여 대기오염물질 배출로 인한 피해를 예방하거나 줄일 수 있음.

○ 본 법령은 주요 대기오염물질을 통합적으로 관리 및 규제하기 위해 대기환경 및 배출허용 기준 설정, 배출 총량 및 부과금 규제 등을 통해 대기질 개선을 목표로 함.

- 본 연구에서 다루는 암모니아(NH₃) 또한 「대기환경보전법」의 주요 대기오염물질로 규정되어 있으며, 이는 축산환경 부문의 관리 및 규제와 밀접하게 관련되어 있음.

1.3.3. 악취방지법

○ 악취방지법은 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성하기 위해 다양한 사업 활동 등에서 발생하는 악취를 방지하는 것을 목적으로 함. 악취는 자극성이 있는 물질로서, 암모니아, 황화수소, 메르캅탄류, 아민류 등 사람의 후각에 불쾌감 또는 혐오감을 발생시키는 냄새를 의미함.

- 가축 사육과정 및 분뇨에서 발생하는 암모니아, 황화수소, 메틸메르캡탄, 다이메틸설파이드류 등이 「악취방지법」 제2조 제2호에 따라 악취물질로 지정되어 있음.
- 시·도지사 또는 대도시의 장은 지속적인 악취 발생을 방지하기 위해 악취 민원이 1년 이상 지속되고, 악취배출시설이 2개 이상 인접하면서 배출허용기준을 초과한 지역을 악취관리지역으로 지정할 수 있음.
 - 암모니아 배출허용기준은 공업지역과 기타 지역을 각각 2ppm, 1ppm 이하로 설정하였으며, 황화수소 배출은 공업지역은 0.06ppm, 기타 지역은 0.02ppm 이하로 제한되어 있음.
- 악취관리지역에서의 악취물질의 농도, 악취의 정도 등 악취실태조사를 주기적으로 실시해야 하며, 이를 기후에너지환경부 장관에게 보고해야 함. 또한, 악취오염으로 인한 위해가 악취관리지역 외에서 발생할 경우, 추가적인 실태 조사를 할 수 있음.
- 악취방지법은 축산업과 관련된 시설의 종류 및 규모 기준에 따라 악취배출시설(시행규칙 [별표 2])을 설정하였음. 이는 축산업의 생산 및 유통 시설에 대한 규제로서 악취 발생을 줄이기 위한 법적 근거임.
 - 축산시설은 축종에 따른 시설 규모 기준을 설정하였으며, 이는 가축의 크기 및 생육 특성의 차이를 반영한 것임. 다른 축산업 시설에서도 관련 법령에 맞는 규모 또는 시설에 따라 악취배출시설로 지정됨.

〈표 3-10〉 축산업 부분의 악취배출시설

시설의 종류	시설 규모의 기준
축산시설	- 돼지 50㎡ 이상, 소·말 100㎡ 이상, 닭·오리·양 150㎡ 이상, 개 60㎡ 이상 - 사슴·기타 500㎡ 이상
도축 시설, 고기 가공·저장처리 시설	- 시설면적 200㎡ 이상
비료 및 질소화합물 제조시설	- 비료 및 질소화합물 제조시설을 포함하는 시설 (「대기환경보전법 시행규칙」 별표 3) - 비료생산업의 공동시설 및 생산시설(「비료관리법 시행령」 별표 2)
하수, 폐수 및 분뇨처리시설	- 수질오염방지시설, 공공폐수처리시설 및 폐수처리업의 처리시설 (「물환경보전법」) - 공공하수처리시설, 오수처리시설, 분뇨처리시설(「하수도법」) - 「가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률」에 따른 처리·공공 처리시설

자료: 국가법령정보센터(검색일: 2026. 2. 9.), 악취방지법 시행규칙 [별표 2] 악취배출시설을 참고하여 저자 작성.

- 복합악취가 배출되는 경우, 악취배출시설의 배출구와 부지경계선에 따른 배출허용기준은 〈표 3-11〉과 같음. 배출구 및 부지경계선에서는 공업지역의 배출허용기준이 기타 지역보다 더 엄격하게 나타남. 예를 들어 배출허용기준에서 배출구를 살펴보면, 공업지역이면 냄새를 1,000배 이하로 희석했을 때 냄새가 느껴지지 않아야 하며, 기타 지역은 500배 이하로 희석했을 때 냄새가 없어져야 함.

〈표 3-11〉 복합악취 배출허용기준

구분	배출허용기준 (희석배수)		엄격한 배출허용기준의 범위 (희석배수)	
	공업지역	기타 지역	공업지역	기타 지역
배출구	1,000 이하	500 이하	500~1,000	300~500
부지경계선	20 이하	15 이하	15~20	10~15

주: '희석배수'란 채취한 시료를 냄새가 없는 공기로 희석하여 냄새를 느낄 수 없을 때까지 최대한 희석한 배수를 말함.

자료: 국가법령정보센터(검색일: 2026. 2. 9.), 악취방지법 시행규칙 [별표 3].

- 해당 법을 위반한 악취배출시설의 경우 조업정지·개선·사용중지·폐쇄 명령의 행정처분을 받을 수 있으며, 악취 저감을 위해 관계기관의 협조 및 재정적·기술적 지원사항에 관해 규정하고 있음(「악취방지법」 제20조 및 제22조).

- 축산업에서의 악취방지법은 악취물질 정의, 정기적인 악취현황실태조사, 축산업 관련 악취배출시설의 기준, 복합악취 배출허용기준 등에 관한 규정을 통하여 축산환경오염 중 축산악취를 관리·규제하기 위한 제도적 기반을 마련하고 있음.

2. 국외 현황

2.1. EU

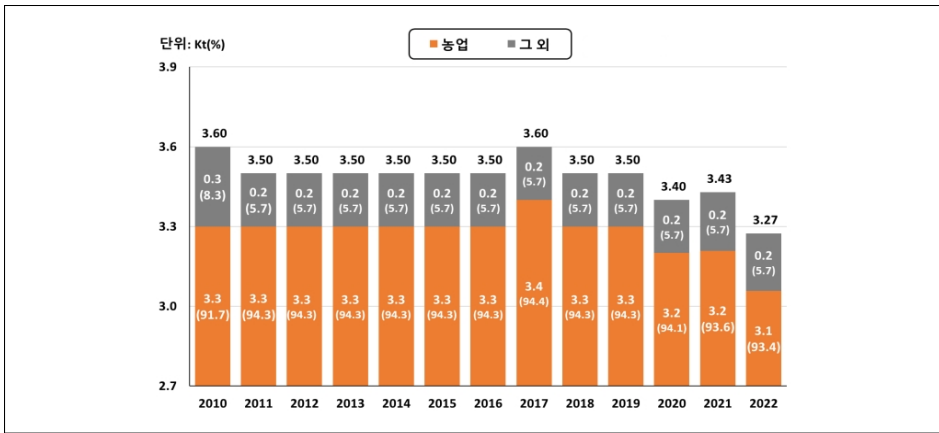
- EU는 대기질 개선을 목적으로 국가 단위의 배출 감축을 제도적으로 관리하고 있음. EU는 2001년 「국가별 배출량 상한 지침(NEC Directive, 2001/81/EC)」을 최초로 채택하여, 회원국별로 SO₂, NO_x, 비메탄휘발성유기화합물(NMVOCs), NH₃에 대한 배출 상한을 설정하였으며, 해당 지침은 2010년을 목표연도로 국가 배출 상한을 규정하였고, 2019년까지 유지됨.
- 이후 EU는 대기오염 문제를 지속적인 관리 사항으로 인식하고, 건강에 대한 영향력을 고려하여 2016년 국가별 배출량 상한 지침을 개정하였으며, 개정된 규정을 2020년부터 적용하고 있음. 개정된 지침은 기존 4가지 물질(SO₂, NO_x, NMVOCs, NH₃)과 더불어 초미세먼지(PM_{2.5})를 신규 규제 대상에 포함시켰으며, 각 오염물질에 대해 2005년을 기준으로 감축목표를 설정하였으며, 이에 따라 회원국은 ①2020년부터 2029년까지와 ②2030년 이후를 구분하여 단계적 감축 목표를 이행하도록 함.
- EU 차원의 배출 구조를 보면, 암모니아(NH₃)는 농업부문, 특히 축산업이 주요 배출원으로 작용하고 있으며, NH₃는 대기 중에서 질소산화물(NO_x), 황산

화물(SO₂) 등과 반응하여 PM_{2.5} 형성에 기여하는 대표적인 미세먼지 전구물질로 인식되고 있음. 이러한 인식 변화에 따라 2016년 개정 지침에서는 PM_{2.5}와 NH₃를 중심으로 보다 강화된 감축 요구가 설정됨.

- 다수의 회원국에서는 PM_{2.5}와 NH₃의 감축률이 SO₂, NO_x, NMVOCs에 비해 상대적으로 높게 설정됨.

○ EU-27의 암모니아 배출량을 살펴보면, 농업부문이 전체 배출량의 약 93%를 차지하는 핵심 오염물질로, EU는 주요 배출원을 축산 분뇨의 처리·저장 과정과 액비 및 무기질 비료의 토지 살포 과정으로 규정하고 있으며, 이에 대한 관리 강화를 통해 배출 저감을 추진하고 있음.

〈그림 3-2〉 EU-27의 암모니아 배출현황(2010~2022년)

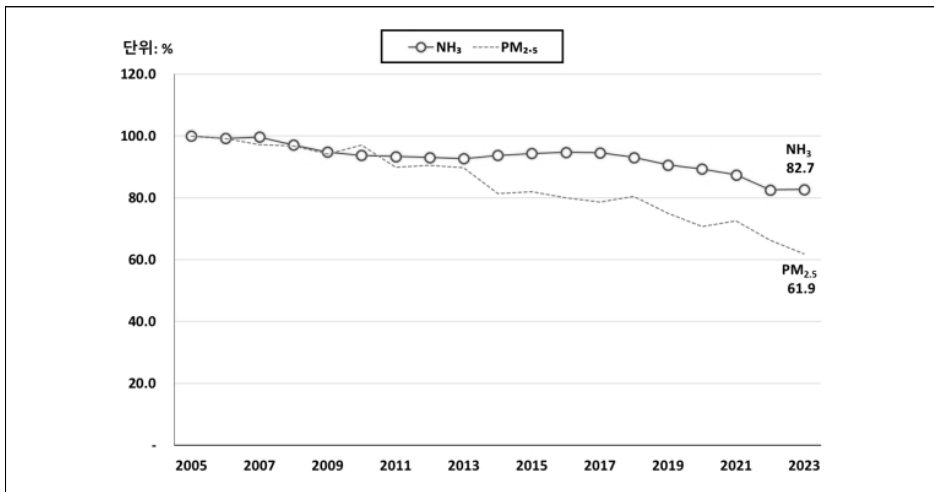


자료: EEA 홈페이지(검색일: 2026. 1. 20.).

○ EU-27의 암모니아 배출량은 2005년을 100%로 가정했을 때, 2023년 82.7% 수준임.⁵⁾ 이러한 결과는 PM_{2.5} 농도 저감 정책과 더불어 농업부문 관리 강화, 비료 사용 효율화, 가축분뇨 처리 개선 등의 영향으로 판단됨.

⁵⁾ 해당 수치는 2005년부터 2023년까지 EU-27의 연간 GDP는 2005년 GDP 수준(100%로 설정) 대비 백분율로 표시되며, 수치는 인플레이션을 반영하여 조정된 실질 GDP를 기준으로 함(EEA).

〈그림 3-3〉 EU의 미세먼지(PM_{2.5}), 암모니아(NH₃) 감축 현황(2005년 대비)



자료: EEA 홈페이지(검색일: 2026. 1. 20.).

○ 국가별 암모니아 감축 결과는 〈표 3-12〉와 같음. 2005년 대비 2023년 암모니아 배출량은 크로아티아(46.4%), 덴마크(32.7%), 핀란드(26.3%), 네덜란드(25.0%), 이탈리아(20.7%) 등 대부분의 나라에서 감축하였음.

- 라트비아와 불가리아는 암모니아 배출량이 2005년 대비 2023년 증가함.

〈표 3-12〉 국가별 암모니아 배출 변화율(2005년 대비)

단위: %

구분	NH ₃	구분	NH ₃	구분	NH ₃
크로아티아	-46.4	헝가리	-17.3	체코	-9.4
덴마크	-32.7	그리스	-17.2	몰타	-8.8
핀란드	-26.3	스페인	-16.9	리투아니아	-7.2
네덜란드	-25.0	루마니아	-16.2	에스토니아	-7.0
이탈리아	-20.7	키프로스	-13.6	아일랜드	-6.1
벨기에	-20.6	슬로바키아	-11.8	오스트리아	-5.8
독일	-20.3	룩셈부르크	-11.6	포르투갈	-2.0
프랑스	-18.7	폴란드	-10.1	라트비아	5.4
슬로베니아	-18.1	스웨덴	-9.9	불가리아	5.9

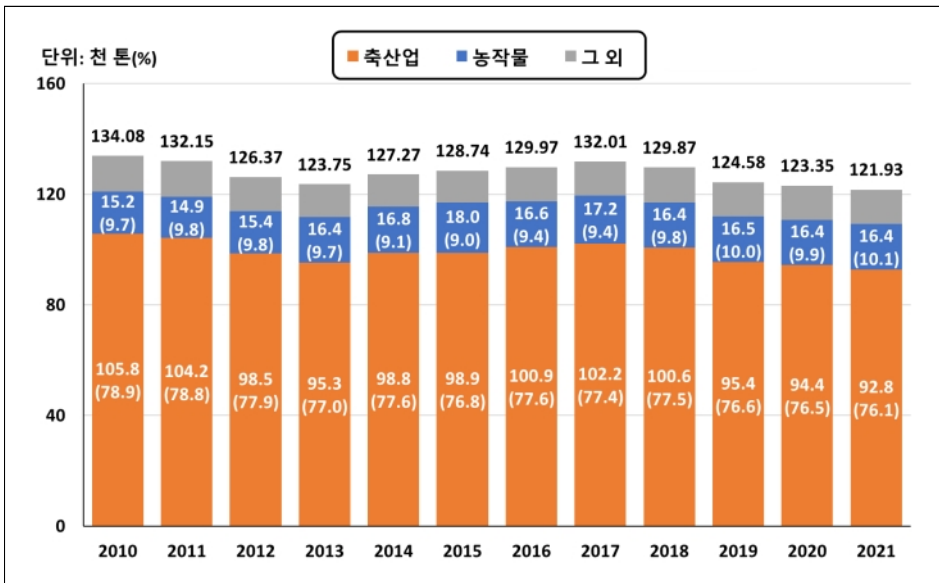
자료: EEA 홈페이지(검색일: 2026. 1. 20.).

○ EU 차원의 제도적 틀 속에서, 네덜란드와 덴마크는 축산 집약도가 높은 구조를 유지하면서도 암모니아 및 미세먼지 전구물질 감축을 지속적으로 추진해 온 대표적인 사례로 평가됨.

□ 네덜란드

○ 네덜란드의 암모니아 발생량은 전반적으로 감소 추세를 보임. 다만, 여전히 암모니아 배출량의 대부분을 농업부문이 차지하고 있으며, 특히 축산업이 75% 이상을 차지함.

〈그림 3-4〉 네덜란드의 암모니아 배출량



주: 그 외에는 주거(residential), 상업 및 공공시설(commercial & institutional), 에너지 공급(energy supply), 수송(transport), 제조업 및 채굴업(manufacturing and extractive industry), 폐기물(waste) 부문 등이 포함됨.

자료: EEA(검색일: 2026. 1. 20.).

- 네덜란드는 축산 집약도가 높은 구조적 특성상 암모니아 배출관리가 국가 대기질 정책의 핵심 과제이며, 환경 규제와 축산업의 지속가능성 사이의 균형을 위해 다양한 논의가 이루어지고 있음. 또한, EU 회원국 중 높은 수준의 환경 규제를 부과하고 있으며, 따라서 대부분의 농가에서 암모니아 저감 조치를 이행을 의무화하고 있음.
- 네덜란드는 암모니아 저감을 위해 암모니아 배출이 높은 농가를 대상으로 자발적 감축 및 사육 중단을 유도하는 프로그램을 운영하고 있음. 이는 사육 중단 또는 규모 축소를 조건으로 보상을 지급하는 선별적 구조조정 수단으로 활용함.
 - 특히 네덜란드는 사육 권리 기반의 관리 제도인 ‘배출권 거래제(Nitrogen & Phosphate Rights)’를 활용하여 농가의 가축 사육을 관리함. 농가는 부여받은 사육 권리 범위 내에서만 운영이 가능하며, 정부는 자연보호구역 인근의 고배출 농가를 매입할 때 해당 농가의 사육 권리를 영구적으로 소멸시키므로 국가 전체의 배출 총량을 관리하고 있음.
- 또한, 네덜란드는 재정 인센티브보다 강한 규제와 허가제를 중심으로 환경보전 활동을 이행함. 따라서 직접적인 보조금 지급은 제한적으로 운영하고 있으며, 세제 감면 등의 간접적 지원 방식이 일반적이며, 대표적인 기술 지원책으로는 MIA(환경투자 세액공제)와 Vamil(임의감가상각) 제도가 있음.
 - MIA: 정부가 지정한 암모니아 저감 설비 등 친환경 기술에 투자할 경우, 투자액의 일정 비율을 과세 대상 이익에서 추가 공제하여 법인세 및 소득세 부담을 경감함.
 - Vamil: 설비 투자 자산의 감가상각 시점을 농가가 자율적으로 선택하게 함으로써, 대규모 투자 초기 단계의 세금 부담을 줄이고 자금 유동성을 확보하도록 함.

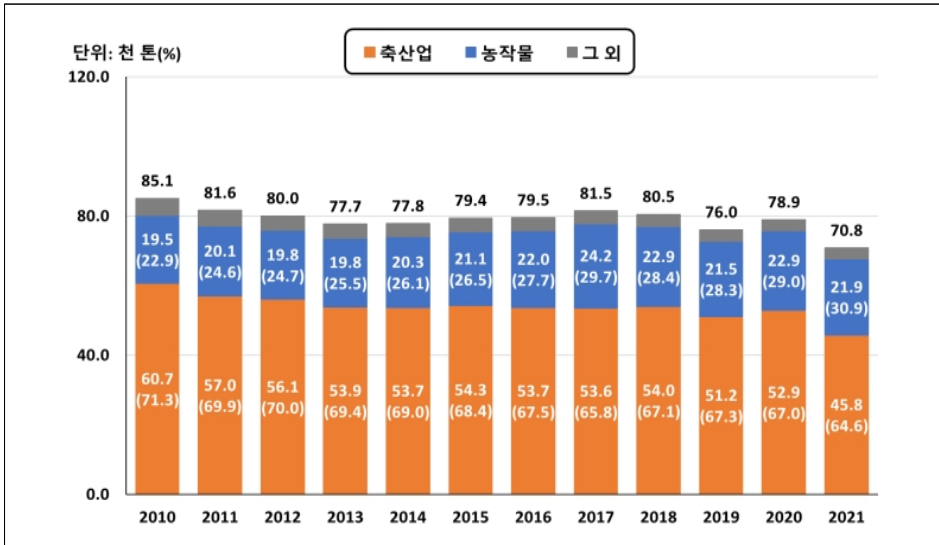
○ 신규 농가에게는 기존 농가보다 강화된 기준을 적용하고 있음. 지역의 환경 수용력과 자연보전 지역 인접 여부 등을 고려하여 허가를 제한하며, 감축 수준은 입지 조건과 허가 유형에 따라 차등으로 설정함. 다만, 기존 농가를 대상으로도 암모니아 배출 기준을 충족하지 못할 경우 허가 갱신을 제한하거나 사유 규모를 조정하는 등의 규제를 적용하고 있음.

□ 덴마크

○ 덴마크의 암모니아 배출현황을 살펴보면 완만한 감소 추세를 보이며, 농업부문이 배출량의 대부분을 차지함. 암모니아 배출량 중 축산업이 차지하는 비중 역시 감소하는 경향을 보임.

- 2010년: 6만 700톤(71.3%) → 2021년: 4만 5,800톤(64.6%)으로 감소함.

〈그림 3-5〉 덴마크의 암모니아 배출량



주: 그 외에는 주거(residential), 상업 및 공공시설(commercial & institutional), 에너지 공급(energy supply), 수송(transport), 제조업 및 채굴업(manufacturing and extractive industry), 폐기물(waste) 부문 등이 포함됨.

자료: EEA(검색일: 2026. 1. 20.).

- 앞서 살펴본 바와 같이 암모니아의 배출은 대부분 농업부문에서 발생하는 만큼, 덴마크 정부는 농업부문을 중심으로 암모니아 저감을 위한 다양한 정책과 규제 수단을 단계적으로 도입·운영하고 있음.
- 덴마크 정부는 수생환경 보호를 목적으로 농업부문 질소 및 가축분뇨관리를 강화함. 「덴마크 수생환경을 위한 실행계획(Action Plans for the Aquatic Environment) I·II·III」(1987년, 1998년, 2004년)은 하천 및 해양 환경 보호를 주요 목표로 하여, 가축분뇨와 화학비료의 이용 및 배출을 규제하고 있음.
 - 실행계획은 수질 보호를 중심으로 설계되었으나, 결과적으로 농업부문의 질소 및 암모니아 배출관리의 기초를 형성함.
- 축산업에 대해서는 환경승인제도(Environmental Approval System for Livestock Farming, 2007)를 도입하여 보다 직접적인 규제를 시행하고 있음. 이 제도는 축사의 신축·확장·변경 시 환경기준을 제시하고, 이를 통해 축산업으로 인한 환경 부담을 관리하는 것을 목적으로 함.
 - 예를 들어, 사육두수 75마리 이상 축산농가는 축사 신축, 변경 또는 증축 시 환경승인을 의무적으로 받아야 하며, 이 과정에서 암모니아 저감량 기준을 충족해야 함.
- 환경승인제도에 따라 규제 대상이 되는 축산농가는 연간 암모니아 배출량이 일정 규모(750kg)를 초과하는 경우로 규정되며, 해당 농가는 신규 축사 설치 또는 기존 축사의 증축·개조 시 환경기준을 충족하고 환경승인을 받아야 함. 덴마크 정부는 개별 농가의 여건을 고려하여 최적적합기술(Best Available Techniques: BAT)을 평가·처방하고, BAT 적용을 전제로 한 배출량 기준을 설정함. 농가는 정부가 제시한 BAT를 적용하여 배출 기준을 충족해야 하며, 이를 이행하지 않을 경우 제재를 받음.

- 2018년 기준으로 덴마크 축산농가의 약 절반이 환경승인 의무 대상으로 분류되어 암모니아 저감 의무를 이행하고 있으며, 환경승인제도는 신규 축사뿐만 아니라 기존 농가의 축사 변경 시에도 적용되므로, 향후 규제 대상 농가의 범위는 더욱 확대될 것으로 예상됨.
- 한편, 덴마크는 축산부문뿐만 아니라 경종 부문에서 퇴비 사용 시 발생하는 암모니아 배출 역시 미세먼지 형성과 관련된 주요 오염원으로 인식하고 있음. 이에 따라 퇴비 살포 방식에 대한 규정, 축산농가가 분뇨를 퇴비로 전환·이용하는 과정에 대한 관리 기준 등 경종 부문의 비료 이용과 관련된 다양한 규제를 통해 암모니아 저감 노력을 병행하고 있음.

2.2. 미국

- 미국은 1970년대 총부유분진(Total Suspended Particles: TSP) 관리를 시작으로, 1990년 청정대기법(Clean Air Act: CAA) 개정을 전후하여 각각 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 대기환경기준을 도입함으로써 대기질 관리체계를 단계적으로 확립함.
- 환경보호청(Environmental Protection Agency: EPA)은 청정대기법에 근거하여 대기환경기준 설정, 측정 및 배출량 관리, 배출허가 및 준법 감시, 국제 협력 등 국가 차원의 대기환경 관리정책을 총괄함.
 - 주 정부는 주 단위 시행계획(State Implementation Plan: SIP)을 수립하고, EPA로부터 위임받은 권한에 따라 국가 대기질 관리제도의 현장 집행을 담당함.

○ 미국은 대기질 기준을 국민 건강 보호를 목적으로 하는 주요(Primary) 기준과 공공복지 및 환경 보호를 목적으로 하는 2차(Secondary) 기준으로 구분하여 관리하고 있으며, 최근 축적된 과학적 연구 성과를 반영하여 대기환경기준 강화를 위한 입법예고를 2023년 1월 6일 발표함.

- PM₁₀의 경우, 애리조나주 등 사막·황무지 인접 지역을 제외하면 환경 및 건강상 영향이 상대적으로 제한적인 것으로 평가되어, 현행 24시간 평균 농도 기준인 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 유지함.
- PM_{2.5}의 경우 국민 건강에 미치는 영향이 크다는 점을 고려하여, 주요(Primary) 기준의 연평균 농도 기준을 2024년 12.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 개정하였으며, 2025년도부터 강화된 기준을 적용함.

〈표 3-13〉 미국의 국가 대기질 관리 기준

지표	평균시간	기준구분	기준 수준 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	기준 형태	비고
PM _{2.5}	연평균	Primary	9.0	3년 주기, 연간 농도 산술평균	'24년 개정 후 '25년 강화
		Secondary	15.0		현행유지
	24시간	Primary & Secondary	35.0	3년 주기, 24시간 농도의 98-분위 평균	현행유지
PM ₁₀	24시간	Primary & Secondary	150	3년 주기, 24시간 농도 연간 1회 이상 한도 초과 금지	현행유지

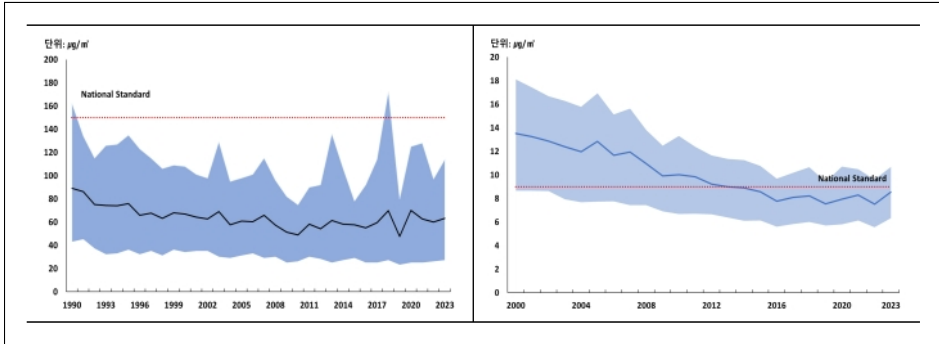
자료: 정학균 외(2023) 원자료; US EPA(검색일: 2026. 2. 5.).

○ 1990년부터 2023년까지 미국의 연평균 PM₁₀ 농도는 89.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 63.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하여 28.8%를 저감한 것으로 나타남. 2000년부터 2023년까지 미국의 연평균 PM_{2.5} 농도는 13.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 8.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하여 약 36.8%를 저감한 것으로 나타남.

- PM₁₀의 경우 1990년과 2018년을 제외한 대부분의 연도에서 90분위 값을 충족하고 있어, 전반적으로 PM₁₀으로 인한 환경적 문제는 제한적인 수준으로 평가됨.

- PM_{2.5}의 경우, 2013년 이후 국가표준인 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 준수하고 있는 것으로 나타남.

〈그림 3-6〉 1990~2023년 연평균 미세먼지 농도 변화 추이



자료: US EPA(검색일: 2026. 2. 5.).

- 미국의 농업부문 PM₁₀과 PM_{2.5} 배출 비율을 살펴보면, 2020년 기준 약 21.9% 수준이며, 축산업 부문은 0.1% 수준임.

〈표 3-14〉 미국 농업부문 연간 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 배출 비율

단위: 천 톤(%)

연도	유형	전체	농업	축산업
2014	PM ₁₀	18,210 (100.0)	5,001 (23.8)	23 (13.9)
	PM _{2.5}	5,406 (100.0)	986 (18.6)	4.16 (15.6)
2017	PM ₁₀	17,063 (100.0)	4,034 (23.6)	0.12 (0.1)
	PM _{2.5}	5,707 (100.0)	794 (13.9)	0.04 (0.1)
2020	PM ₁₀	16,784 (100.0)	3,669 (21.9)	0.09 (0.1)
	PM _{2.5}	5,823 (100.0)	719 (12.3)	0.04 (0.1)

자료: US EPA(검색일: 2026. 2. 5.). 2017, 2020, 2023 자료 참고.

○ 미국의 암모니아 배출량은 증가하고 있음. 2014년 전체 배출량은 359만 4,000톤에서 2020년 548만 5,000톤으로 약 52.6% 증가함. 동기간 가축분뇨에 인한 암모니아 배출량은 207만 5,000톤에서 269만 6,000톤으로 약 29.9% 증가함.

- 2020년 기준 전체 배출량 중 가축분뇨로 인한 암모니아 배출량은 49.2%를 차지함.

〈표 3-15〉 미국 농업부문 연간 암모니아 배출 비율

단위: 천 톤(%)

구분	2014	2017	2020
전체	3,594 (100.0)	4,320 (100.0)	5,485 (100.0)
가축분뇨	2,075 (57.7)	2,569 (59.5)	2,696 (49.2)
비료	787 (21.9)	926 (21.4)	1,834 (33.4)

자료: US EPA(검색일: 2026. 2. 5.). 2017, 2020, 2023 자료 참고.

○ 미국은 연방 차원의 대기환경 관리 법령인 CAA를 통해 대기오염물질을 규제하고 있으나, 암모니아를 독립 규제 대상 오염물질로 명시하여 배출 기준을 설정하는 제도는 마련하고 있지 않음.

○ 미국의 암모니아 관리체계는 대기오염물질로 직접적인 규제 대상으로 규정하기보다는 자원 관리(영양분)와 수질보호라는 틀에서 농업부문의 변화를 유도하고 있음.

○ 대규모 집중가축사육시설(Concentrated Animal Feeding Operation: CAFO)은 「청정수법(Clean Water Act: CWA)」에 의해 오염물질 배출 제거 시스템(National Pollutant Discharge Elimination System: NPDES) 허가를 받는 등 수질 관리 중심의 규제가 적용되고 있음.

- 이 규제는 분뇨 유출로 인한 수질 오염 방지가 주목적이지만, 분뇨 저장 시설의 밀폐, 토지 살포 시기 및 방법 제한 등을 강제함으로써 결과적으로 암모니아가 공기 중으로 날아가는(휘산) 양을 크게 감소시킴.

○ 영양관리계획(Nutrient Management Plan: NMP)은 작물에 필요한 만큼의 영양분만 공급하여 환경 유출을 최소화하는 제도로, 질소 및 비료 투입을 계획적으로 관리하는 것을 목적으로 함. 이는 캘리포니아 등 일부 주에서 환경 허가 기준으로 활용되며, 질소비료의 과잉 살포를 막아 암모니아 배출을 억제하는 수단으로 활용됨.

○ 또한, 우수관리기법(Best Management Practices: BMP)을 활용하여 강제 규제보다 자발적 참여와 지원 기술을 통해 암모니아 배출 감축을 유도함. 이는 대표적으로 ①비료최적화, ②저장 및 살포, ③사료 개선 등이 있으며, 환경질 개선 장려 프로그램(EQIP)을 통해 농가에서 BMP 장비를 구입하거나 시설을 개선할 경우 비용의 일부를 재정적으로 지원하고 있음.

- 비료 최적화는 4R 영양분 관리(적정비료 정리, 적정량, 적기, 적소) 원칙을 통해 휘산을 방지함.
- 저장 및 살포는 분뇨 덮개 설치 및 액비 직접 주입 장비 도입을 통해 암모니아 배출을 40~90% 이상 줄일 수 있는 대표적인 BMP로 평가됨.
- 사료 개선은 단백질 함량을 조절하여 가축분뇨 내 질소 함량을 낮추는 방식으로 최신 기술 지원 프로그램의 주요한 과제 중 하나로 평가됨.

2.3. 일본

- 일본은 환경기본법을 통해 대기오염물질 배출량 목표를 설정하고 있음. 다만, 대기환경기준에서 암모니아를 별도로 규제 물질로 설정하고 있지 않으며, 암모니아는 악취방지법 또는 지역 단위 관리 지침으로 관리함.

- 일본의 암모니아 배출량은 추계가 어려워 Regional Emission Inventory in AISA(REAS) 시뮬레이션 모델을 통해 추정치가 주로 발표됨(정학균 외, 2023). 2015년 기준 암모니아 총배출량은 34만 9,000톤으로 1990년 약 45만 2,000톤 대비 77.2% 수준으로 감소함.
 - 농업부문의 암모니아 배출량은 1990년 대비 감소했으나 여전히 주 배출원임. 전체 배출량 중 70%는 농업부문이 차지하고 있으며, 이 중 가축분뇨관리가 52.3%, 화학비료 및 가축분뇨 비료가 18.9%를 차지함.

- 일본은 암모니아 배출에 대해 직접 규제보다는 관리 지침 및 공정 개선 등을 통해 간접적으로 유도하는 방식을 취하고 있음. 대표적인 암모니아 저감 관련 법령은 「악취방지법」, 「가축분뇨의 관리 및 이용 촉진 등에 관한 법률(가축분뇨법)」 등과 각 지방자치단체 차원의 농업환경 조례 등이 있음.

- 「악취방지법」은 공장 및 사업장에서 발생하는 악취를 규제하는 법으로, 축산농가 또는 가축분뇨 처리시설에서 발생하는 암모니아 농도를 규제함. 다만, 해당 농도는 지역에 따라 1ppm에서 5ppm 사이에서 관리하고 있으며, 이 범위를 초과할 경우 개선 권고 및 명령을 받게 됨.

- 또한, 시설 관리 가이드라인에서는 약액 세정, 바이오 필터, 밀폐화 등을 통해 암모니아 배출을 물리적으로 막기 위한 근거를 마련하고 있음.

- 약액 세정: 배출 가스를 세정액으로 처리하여 오염물질을 제거하는 방식
 - 바이오 필터: 미생물을 이용해 암모니아 성분을 분해하는 방식
 - 밀폐화: 분뇨 저장조에 덮개를 설치하여 대기 중으로의 휘산을 방지하는 방식
- 「가축분뇨법」은 과거 야적 또는 저류 방식으로 처리하던 가축분뇨를 적정 관리와 자원화를 법적 의무로 규정하는 법으로, 가축분뇨를 처리하거나 보관할 때 반드시 시설(축사, 퇴비사 등) 내에서 관리하도록 규정함. 또한, 농가가 적정한 분뇨처리를 할 수 있도록 정부의 금융지원 및 세제 혜택을 제공할 수 있는 법적 근거를 마련하고 있음.
- 다만 해당 법률은 모든 농가에 일정하게 적용하는 것이 아닌, 일정 규모 이상의 농가를 대상으로 의무를 부여하고 있음. 소의 경우 10마리 이상, 돼지는 100마리 이상, 닭은 2,000마리 이상을 기준으로 함.
- 이 외에도 지방자치단체 차원에서 농업환경관리 조례에 따라 농가별 분뇨처리 기준, 퇴·액비 살포 시기 제한 등을 통해 암모니아 배출을 억제하고 있음.
- 중앙정부에서 정하고 있는 포괄적 법률(가축분뇨법)을 지자체의 기후나 주거지와와의 거리를 고려하여 시설의 구조(벽 높이, 밀폐 정도)나 관리 방식으로 구체화함.
 - 일본의 많은 지자체는 조례나 환경 지침을 통해 기온이 너무 높거나 바람이 강한 날, 또는 주말 등에 살포하는 것을 자제하도록 권고하거나 제한함. 또한, 살포 직후 흙을 갈아엎어 덮도록 의무화하여 일본의 암모니아가 휘산하는 것을 방지함.
- 2021년 일본은 이러한 개별 법령과 지침을 아우르는 「미도리 식료 시스템 전략(みどりの食料システム戦略)」을 발표하여 기존의 생산성 중심 접근을 벗어

나 탄소중립·자원순환·환경보전형 농업으로의 구조변화를 구체적인 목표와 함께 제시함.

○ 미도리 식료 시스템 전략은 2050년을 목표로 화학비료 사용량 저감, 유기농업 확대, 농업 분야 온실가스 배출 감축, 스마트농업 및 혁신 기술 도입 등을 주요 과제로 설정함. 특히 질소·비료 관리 효율화, 가축분뇨의 적정 처리 및 자원화, 환경부담 저감형 기술 확산을 통해 농업의 환경영향을 체계적으로 줄여나가는 것을 중심 과제로 설정함.

- 화학비료 사용량 저감: 2050년까지 화학비료 사용량을 30% 감축하는 것을 목표로 하며, 이를 위해 AI를 활용한 정밀농업 기반의 비료 관리 기술과 가축분뇨를 활용한 유기질 비료로의 전환을 목표로 함.

- 유기농업 확대: 현재 1% 미만의 유기농지 면적을 2050년까지 전체 농지의 25%(100만 ha)로 확대하여 질소질 비료에 대한 대기 및 수질 오염 감소를 목표로 함.

- 혁신 기술 도입: 암모니아 발생을 줄이는 저단백 자료의 보급과 분뇨 처리 과정에서의 온실가스·악취통합제어시스템을 구축하는 기술적 지원 강화를 목표로 함.

○ 미도리 식료 시스템 전략은 기존의 「악취방지법」 중심의 사후 관리와 「가축분뇨법」 중심의 적정 처리를 넘어, 투입재(비료·사료) 자체의 저감이라는 보다 능동적이고 종합적인 단계의 목표로 평가됨.

○ 미도리 식료 시스템 전략은 규제 중심의 접근보다는 기술 혁신, 민관 협력, 인센티브 제공 등을 통해 농가와 식품기업의 자발적 참여를 유도하는 방식임. 이를 위해 연구 개발 강화, 실증사업 확대, 친환경 농산물·식품에 대한 시장 창출, 소비자 인식 제고 등을 병행 추진하고 있음.

4

축산업과 암모니아 농도의 실증분석

1. 분석 데이터

1.1. 암모니아 위성 데이터

- 본 연구에서는 미국 국립해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA-20)의 JPSS(Joint Polar Satellite System)-1 위성에 탑재된 CrIS(Cross-track Infrared Sounder) 관측 장치로부터 측정된 자료를 기반으로, 암모니아(NH_3)의 연직분포(Vertical Distribution) 데이터를 활용함.
- 대기 중 암모니아의 연직분포는 미국 항공우주국(NASA)의 TRopospheric Ozone and Precursors from Earth System Sounding(TROPESS) 프로젝트에서 산출되었으며, 이는 2021년부터 현재까지의 기간을 대상으로 전 지구 자료를 제공함.

○ 본 연구는 2021년부터 2025년 동안 대기압 기준 약 900-650hPa⁶⁾ 범위에서 관측된 시간별 암모니아(NH₃) 농도를 연구에 활용함. 암모니아 농도는 ppbv(parts per billion by volume) 단위로 나타냄.

- 암모니아(NH₃)는 주로 대기 경계층(boundary layer)에 집중되어 존재하여, 앞선 대기압 기준에서 암모니아 변동성이 가장 민감하여, 해당 기준을 연구에 사용함. 또한, 관측대상을 육지로 한정하고, 기압에 따른 민감도 값을 활용하여 저품질 자료 및 이상치를 제거하였음.

○ 암모니아 위성 데이터의 공간 해상도 및 연구 분석을 고려하여, 대한민국을 14km×14km 크기의 정사각형 격자로 나눈 후, JPSS-1 위성에서 관측된 암모니아 농도 값을 해당 격자에 입력하였음.

- NOAA-20의 JPSS-1 위성은 대한민국의 모든 시·군·구에서 암모니아 농도를 측정하는 것은 아니며, 일정한 위도와 경도 범위의 구역을 대상으로 암모니아 농도를 주기적으로 관측함.

- 따라서 본 연구에서는 위성 관측 해상도에 적합한 격자 기반 관측값을 활용하여 공간적 불균형을 완화하고, 일부 지역에서는 행정구역 단위보다 높은 해상도의 관측값을 활용하여 연구를 수행함.

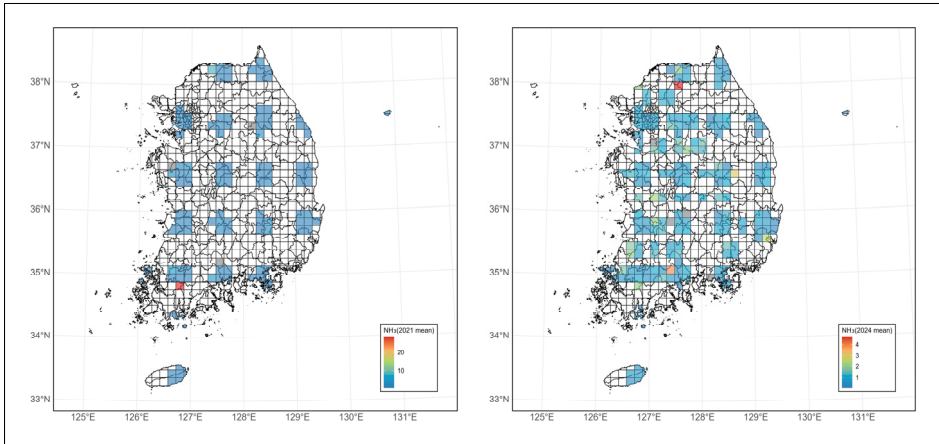
○ <그림 4-1>은 2021년과 2023년 연평균 암모니아(NH₃) 농도를 대한민국의 14km 공간 격자 안에 표시한 결과를 보여줌. 즉, JPSS-1위성에 탑재된 CrIS 관측자료를 기반으로 산출된 암모니아 농도의 공간적 분포를 나타냄.

- 2021년과 2023년도 평균 암모니아 농도는 균일하게 분포하지 않고, 일부 격자에서 상대적으로 높은 암모니아 농도가 관측되며, 불연속적인 공간 패턴을 보임.

⁶⁾ 위성 자료에서 활용한 900-650 hPa 민감도 범위는 대략 지표면으로부터 약 1~4 km 고도에 해당하며, 이는 대기 하층에서의 암모니아 분포 특성을 반영함.

- 그림 내 색상의 분포를 살펴보면, 대부분 격자에서는 낮은 암모니아(NH_3) 농도를 나타내는 파란색이 관측되었으며, 2021년 남부 지역의 특정 격자(나주와 영암)에서는 상대적으로 높은 암모니아 농도를 나타내는 빨간색이 관측됨. 하지만 2023년에는 해당 지역 격자의 색이 파란색으로 변화한 점을 통해 암모니아 농도가 2021년 대비 낮아진 것으로 확인됨.
- 이러한 고농도 격자는 축산활동, 농업 비중, 또는 국지적 배출원의 영향 가능성을 보여주며, 직접적인 원인 식별이 아닌 공간적 분포의 특성을 보여줌.

〈그림 4-1〉 대한민국 연평균 암모니아(NH_3) 공간분포(2021년, 2023년)



자료: NASA(검색일: 2025. 10. 21.), EARTHDATA - TROPES C_rIS(JPSS-1)를 활용하여 저자 작성.

1.2. 축산업 데이터

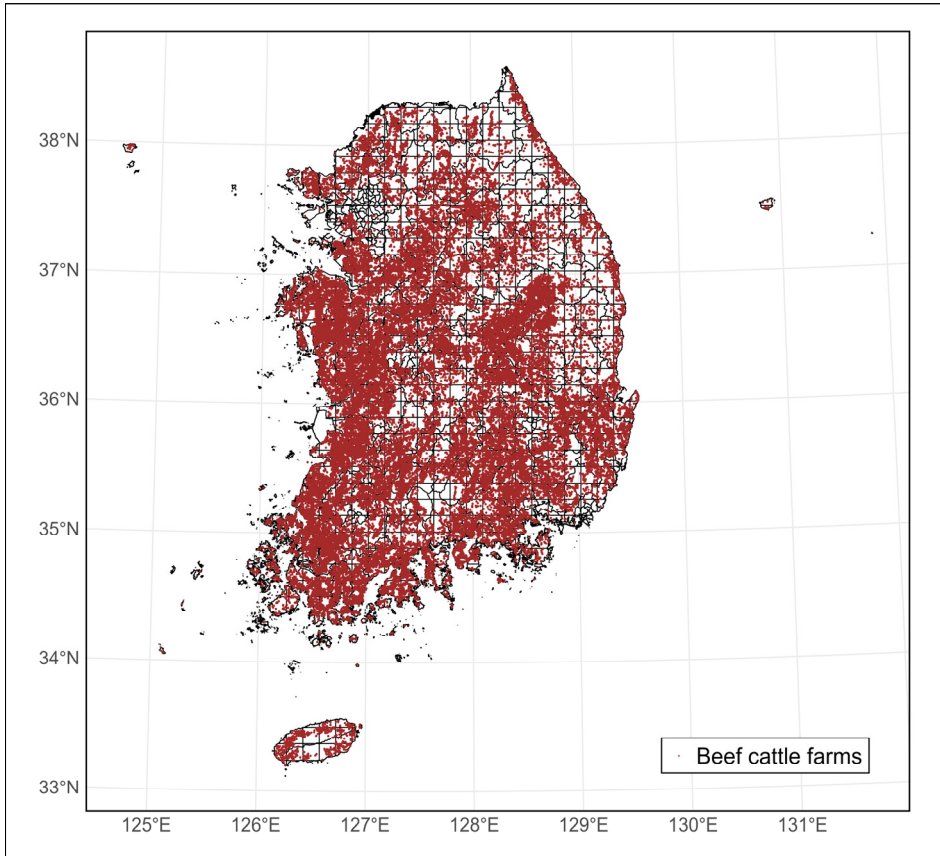
1.2.1. 축산농가

- 축산업이 암모니아 농도에 미치는 영향을 분석하는 데 있어, 축산농가의 사육 규모는 암모니아 배출 수준을 설명하는 중요한 변수임. 가축의 사육과정에서 발생하는 분뇨의 저장, 처리, 살포 과정에서 암모니아가 대량 배출되며, 이러한 배출 특성은 축종별 사육 규모와 밀접한 관련이 있음(Kupper et al., 2015; Lunghi et al., 2024; Bai et al., 2022).

- 대기 중 암모니아 농도는 지상 배출원의 공간적 분포에 영향을 받기 때문에 축산농가 자료를 활용한 분석이 중요함. 본 연구에서는 국내 축산농가의 위치와 주요 축종별 마릿수 자료를 활용하여 위성 관측 기반 암모니아 농도와의 관계를 분석함.
 - 축산농가 데이터는 분기별 농가 단위의 정보(위치 및 운영상태)와 축종별 사육 마릿수, 평균 사육 마릿수, 최대 사육 마릿수 등을 포함하고 있으며, 한·육우, 젓소, 돼지, 가금류 등을 대상으로 함.
 - 본 연구는 2021년 1분기부터 2025년 2분기까지의 축산농가 위치·운영상태를 고려하여 소(한·육우, 젓소), 돼지, 닭(육용계, 산란계)의 사육 마릿수를 분석에 활용함.

- 국내 한·육우와 젓소 농가의 공간적 위치는 <그림 4-2>와 같이 나타남. 우선 한·육우 축산농가는 전국적으로 분포하며, 특히 충청, 전라, 경상 지역을 중심으로 상대적으로 밀집된 양상을 보임. 반면, 수도권 및 대도시 인접 지역에는 한·육우 농가 밀집도가 상대적으로 낮게 나타남.

〈그림 4-2〉 한·육우 농가 위치 분포(2021~2025)

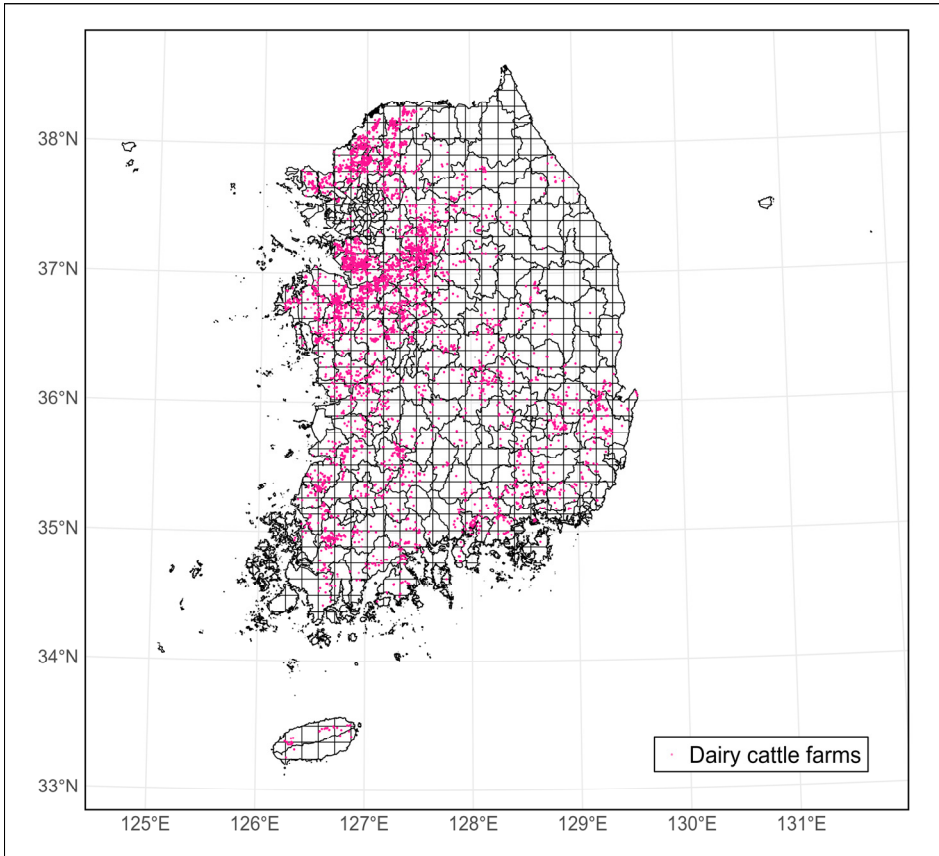


자료: 가축위생방역지원본부 내부자료(FAHMS)와 R-Studio를 활용하여 저자 작성.

○ 젖소 농가의 공간분포를 살펴보면, 전국적으로 분포하고 있으나 한·육우 대비 지역별 편차가 뚜렷하게 나타남. 젖소 사육농가는 대도시와 인접한 지역과 충청, 전북의 일부 지역에 상대적으로 집중되어 있음(그림 4-3).

- 젖소 농가는 원유 가공 및 유통 여건, 소비시장 접근성 등을 고려할 때 수도권 및 대도시와의 접근성이 좋은 지역에 집중됨.

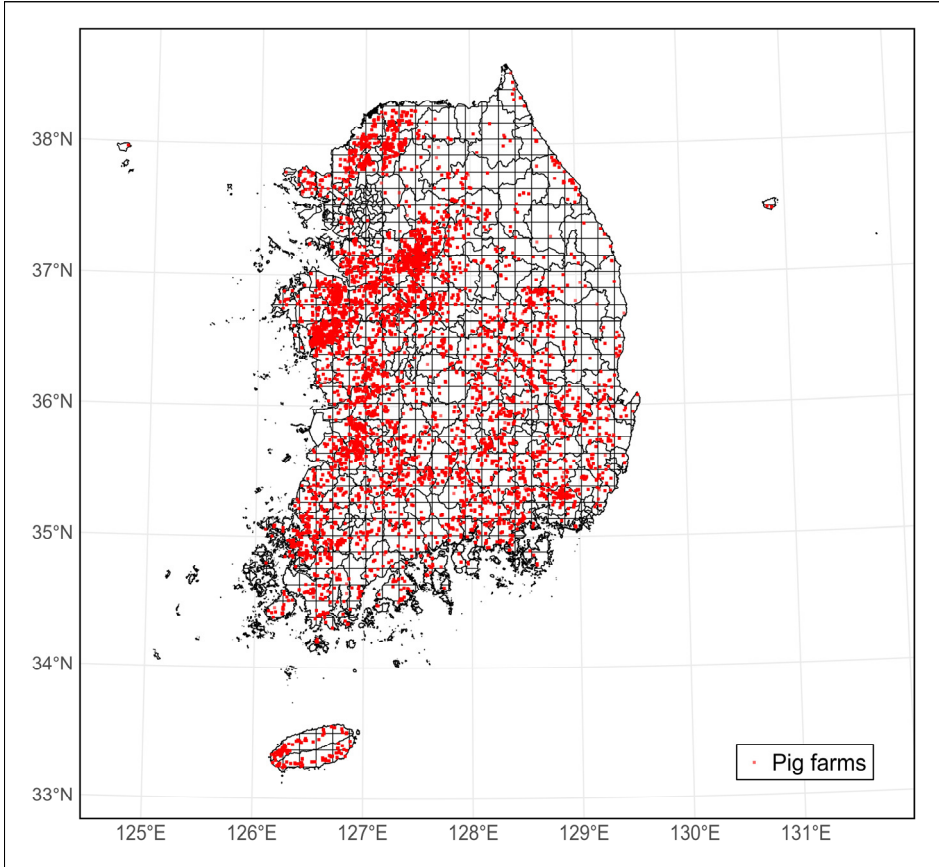
〈그림 4-3〉 젖소 농가 위치 분포(2021~2025)



자료: 가축위생방역지원본부 내부자료(FAHMS)와 R-Studio를 활용하여 저자 작성.

- 국내 돼지 사육 농가는 〈그림 4-4〉와 같이 수도권 남부, 충남, 충북 지역에 집중적으로 위치함. 또한, 전남과 전북의 일부 지역에서도 다수의 돼지 사육 농가가 분포되어 있음. 돈사에서 배출된 암모니아는 악취와 환경 민원의 주요 원인으로 농가 차원의 암모니아 농도 관리 노력뿐만 아니라, 정부의 지속적인 관리와 규제가 시행되고 있음.

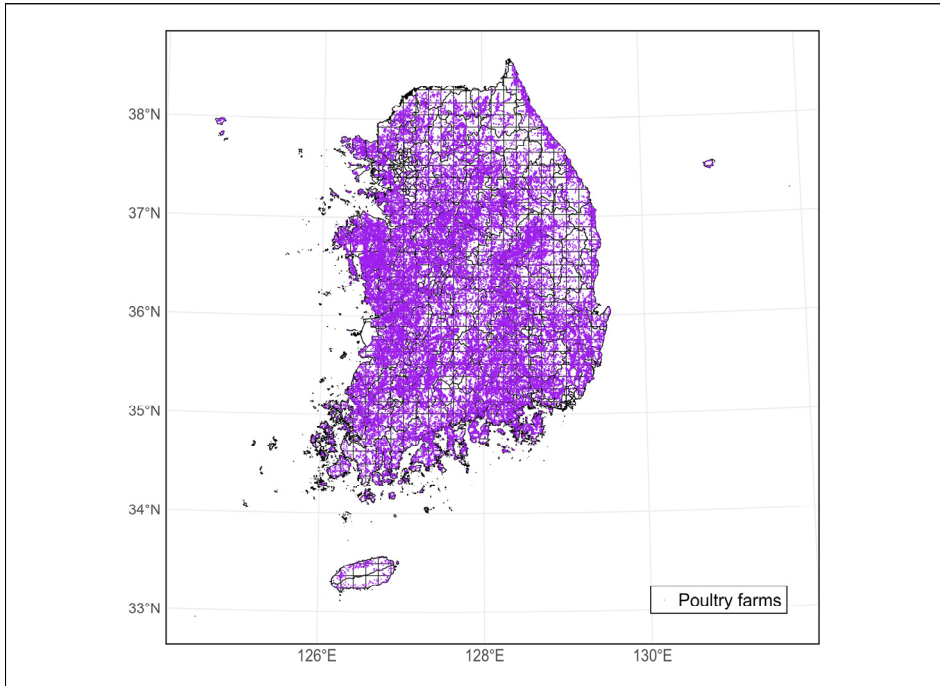
〈그림 4-4〉 돼지 농가 위치 분포(2021~2025)



자료: 가축위생방역지원본부 내부자료(FAHMS)와 R-Studio를 활용하여 저자 작성.

○ 〈그림 4-5〉를 통해 닭(산란계 및 육용계) 사육 농가는 다른 축종에 비해 개별 농가 규모는 작지만, 전국적으로 광범위하게 분포하는 특성을 보임. 특히 경기 남부와 충청·충북, 전북·전남 일부 지역에서 상대적으로 높은 밀집도를 확인하였음. 이는 앞선 축종들의 위치 분포와 마찬가지로 사료 수급의 용이성, 도계·유통 시설과의 접근성 등을 고려한 결과로 보임.

〈그림 4-5〉 닭 농가 위치 분포(2021~2025)



자료: 가축위생방역지원본부 내부자료(FAHMS)와 R-Studio를 활용하여 저자 작성.

- 앞서 제시된 축산농가의 공간적 분포와 사육 규모는 축종별·지역별로 뚜렷한 차이를 보이고 있으며, 이는 암모니아 배출 특성의 차이를 반영하는 중요한 특성으로 작용함. 특히 축종별 마릿수는 분뇨 발생·저장·처리 과정에서 발생하는 암모니아 배출량과 밀접하게 관련되어 있음.

1.2.2. 가축분뇨 공공 처리시설

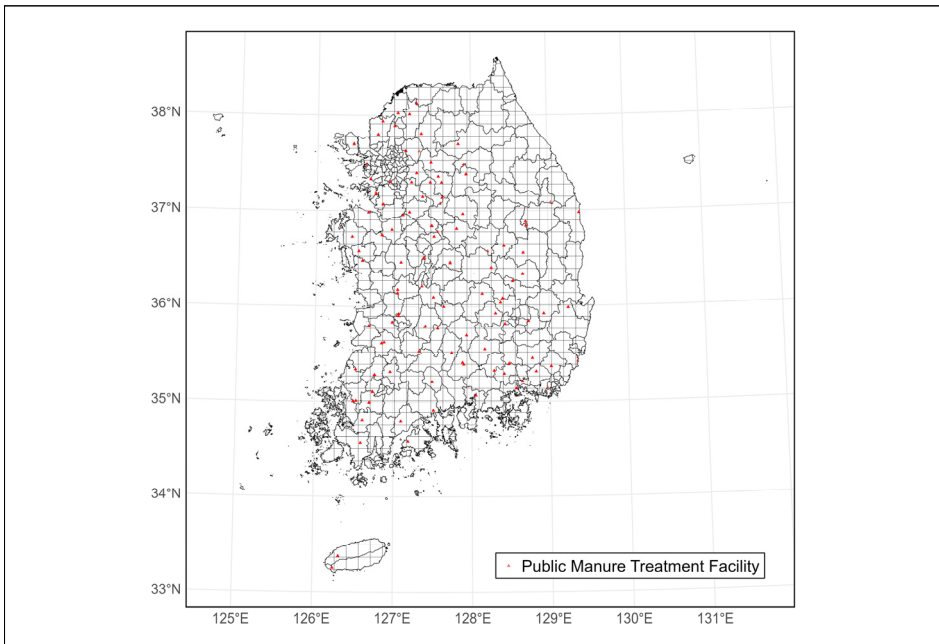
- 축산업에서의 암모니아 배출은 가축 사육 활동뿐만 아니라 가축분뇨 처리시설에서도 발생할 수 있음. 가축분뇨 처리시설은 운영 주체별로 지방자치단체 또는 정부 산하기관이 운영하는 공공시설과 개별 농가 및 민간기업 등이 운영하는 민간 처리시설로 구분됨.

- 주요 처리방식으로는 정화, 퇴비화, 액비화, 바이오화, 고체연료화 등이 있으며, 공공 처리시설은 대부분 정화 및 퇴비처리방식을 사용함.

○ <그림 4-6>은 가축분뇨를 처리하는 공공시설의 분포를 나타냄. 공공 처리시설은 전국적으로 고르게 분포되어 있으며, 특히 축산업 규모가 큰 지역인 경기, 충청, 전북 일부 지역에 많은 시설이 있음. 또한, 산간 및 도서 지역에는 시설이 상대적으로 적으며, 전남, 경북, 경남에도 가축분뇨 공공 처리시설이 고르게 분포되어 있음.

○ 본 연구에서는 기후에너지환경부 소관의 가축분뇨 공공 처리시설 위치 및 시설용량을 활용하여 추가적인 분석을 수행함. 이를 통해 축산활동뿐만 아니라 다른 축산업의 요소와 암모니아 간의 관계를 살펴보고자 함.

<그림 4-6> 가축분뇨 공공 처리시설 분포(2021~2024)

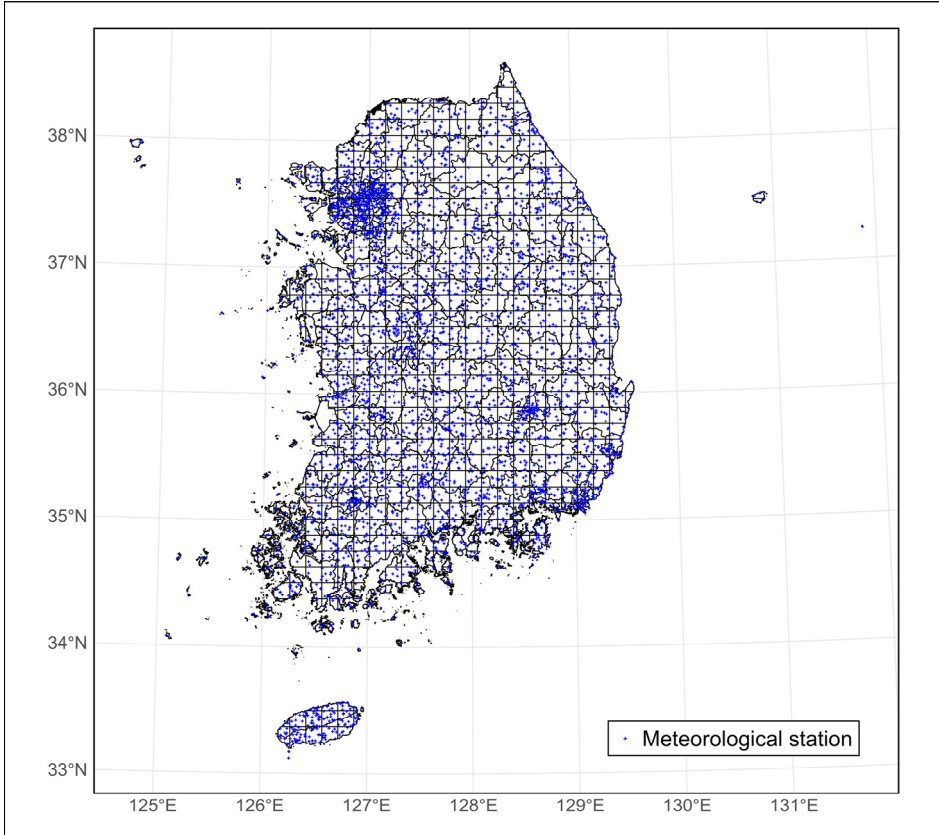


자료: 기후에너지환경부 홈페이지(검색일: 2026. 2. 7.).

1.3. 기상 데이터

- 국내 축산업의 공간 및 규모 특성은 암모니아의 주요한 지상 배출원을 설명하는 데 중요한 변수임. 다만 대기 중 암모니아 농도는 배출 규모뿐만 아니라 기온, 풍속, 강수량 등 다양한 기상 조건에 의해 크게 변화할 수 있음.
- 따라서 본 연구의 목적인 축산업과 암모니아 농도 간의 관계를 분석하기 위해 기상변수를 통제해야 함. 기상 조건을 고려하지 않을 경우, 축산업 활동의 영향이 과대 또는 과소 추정될 가능성이 있음.
- 본 연구에서는 지상에서 관측된 기온, 풍속, 강수량 등 주요 기상변수를 수집하고, 이를 격자 단위로 자료를 구축한 뒤 분석모형의 통제변수로 활용하여 축산업 활동이 암모니아 농도에 미치는 영향을 분석하고자 함.
 - 국내 기상관측소는 국지적 기상 현상을 파악하기 위하여 정해진 시간에 기온, 강수, 바람, 습도 등을 측정함. 이에 본 연구에서는 개별 측정소마다 시간별 기상 자료를 수집하여 격자 단위로 환산한 뒤 연구에 활용함.
- 국내 지상관측소는 <그림 4-7>에서 나타난 것과 같이 전국적으로 고르게 분포되어 있음. 따라서 지역별 기상 조건을 충분히 반영한 데이터를 확보할 수 있으며, 격자 단위 분석에서 기상변수의 대표성과 신뢰성을 확보할 수 있음.
 - 분석 단위인 격자에는 최소 1개 이상의 기상 관측소가 포함되어 있음. 또한, 수도권 및 주요 도시뿐만 아니라 농촌 및 산간 지역에도 관측소가 설치되어 있어 지역별 기상 특성을 적절히 반영할 수 있음.

〈그림 4-7〉 국내 날씨 측정소 위치 분포(2021~2025)



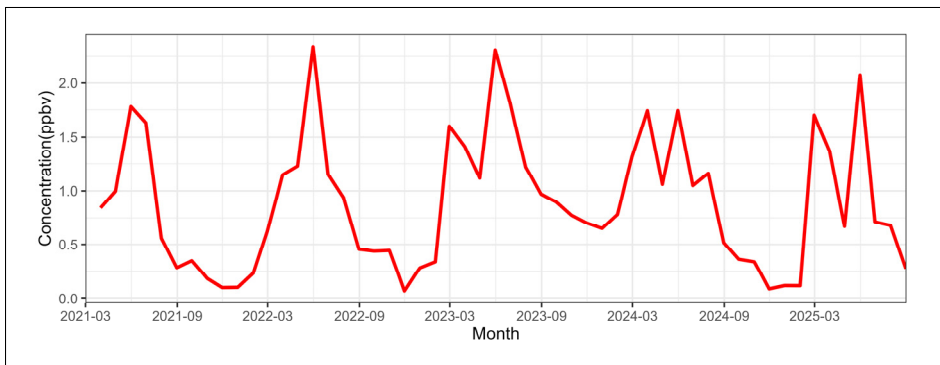
자료: 기상청 기상자료개방포털(2025. 11. 10.) 및 R-Studio를 활용하여 저자 작성.

2. 기초통계 및 예비적 분석

2.1. 평균 암모니아(NH₃) 농도 및 초과 일수

○ <그림 4-8>은 2021년부터 2025년까지 연구에 사용된 격자의 평균 암모니아(NH₃) 농도 추세를 보여줌. 주로 봄부터 초여름 구간(5~6월)에 암모니아 농도가 높게 나타났음. 이를 통해 암모니아 농도는 계절성이 있으며, 주로 농업 활동이 많아지고, 기온이 상승하는 기간에 농도는 높게 나타남. 반대로 겨울철의 농도는 낮은 온도로 인해 휘발이 감소하여 낮은 값을 보임. 이러한 추세는 암모니아 발생이 특정 시기에 집중되고 있음을 보여주며, 암모니아 저감 정책은 고배출 시기에 집중적으로 관리할 필요성이 있음을 시사함.

<그림 4-8> 국내 월평균 암모니아 농도 추이(2021~2025)

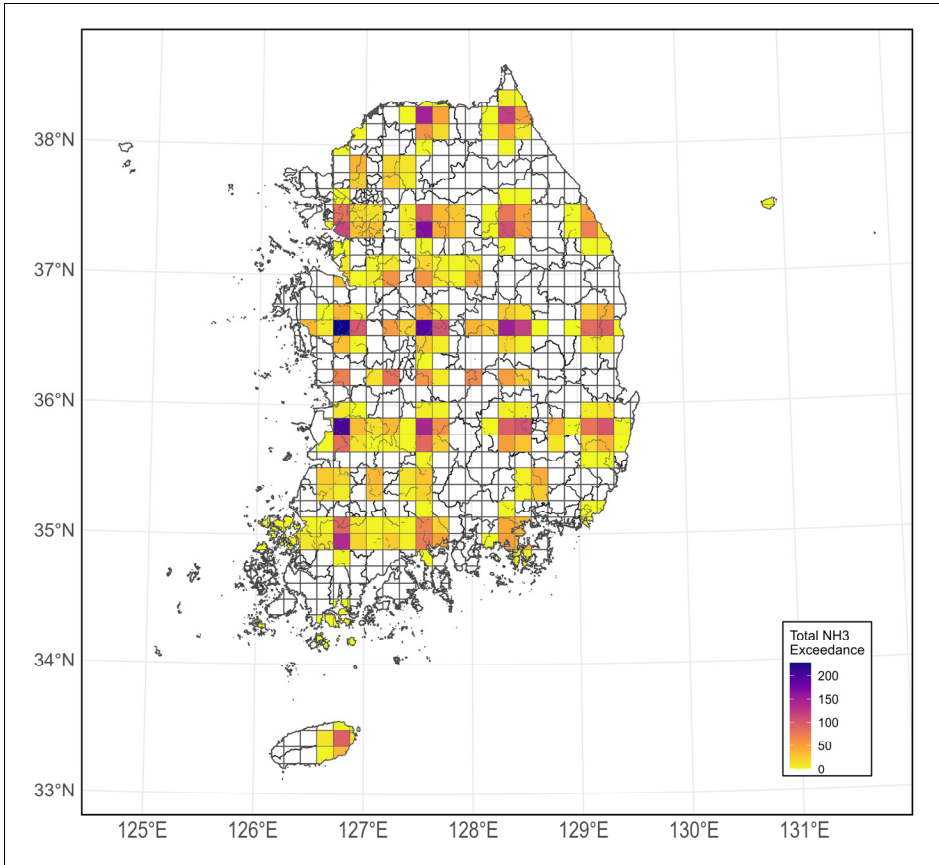


자료: NASA(검색일: 2025. 10. 21.), EARTHDATA - TROPES CrIS(JPSS-1)를 활용하여 저자 작성.

○ <그림 4-9>는 분석 기간의 암모니아 평균 농도 값을 초과한 일수를 격자 단위 표시함. 기준치(평균 농도)를 초과한 일수를 활용한 것은 본 연구 자료의 한계 점을 보완하면서, 암모니아의 오염 수준을 공간적으로 비교·반영할 수 있다는 점에서 장점임.

- 초과 일수는 특정 지역에 집중되는 공간적 패턴을 보여주며, 특히 농·축산활동이 활발한 지역의 격자에서 상대적으로 높은 빈도수가 관찰됨. 예를 들어 김제, 예산, 홍성, 청주시, 나주시 일부 지역을 포함한 충남, 충북, 전남이 평균 농도 초과 일수가 많은 지역으로 표시됨.

〈그림 4-9〉 암모니아 평균 농도 초과 일수의 분포(2021~2025)

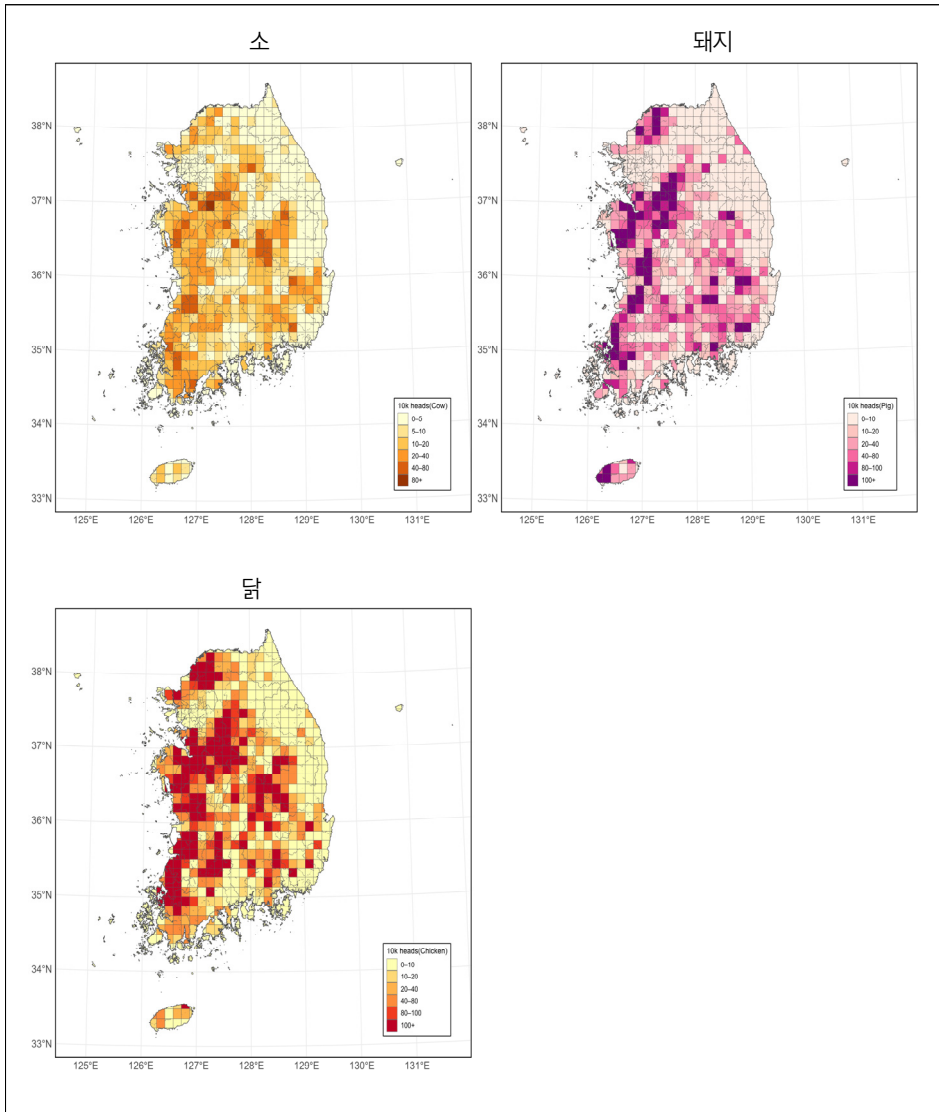


자료: NASA(검색일: 2025. 10. 21.), EARTHDATA - TROPES C_rIS(JPSS-1)를 활용하여 저자 작성.

2.2. 축종별 사육 마릿수 분포

- <그림 4-10>에서는 주요 축종(소, 돼지, 닭)의 총 사육 마릿수를 격자를 활용하여 분포를 나타냄. 또한, <표 4-1>에서는 위성 관측자료가 존재하는 격자 번호(Cell ID)에 속한 총 사육 마릿수와 평균 농도 초과 일수를 함께 제시함.
- 전체적으로 경기 남부, 충남, 충북, 전북 일부 지역에서 주요 축종이 많이 사육되고 있음. 구체적으로 살펴보면, 소의 총 사육 마릿수는 안성시, 진천군, 천안시 일부 지역이 포함된 격자(Cell ID = 516)에서 가장 많았으며, 평균 농도를 초과한 일수 역시 59회로 큰 값을 보임. 또한, 구미시, 김천시가 속한 격자(Cell ID = 383)는 소의 총 사육 마릿수가 두 번째로 많았으며, 초과 일수는 51회로 나타남.
- 돼지의 경우, 총 사육 마릿수가 많은 격자(440)에서는 평균 암모니아 농도를 초과하는 일수가 8회로 나타났으며, 다른 격자 번호(302, 541, 564)에서는 각각 34, 18, 2회의 초과 일수가 나타남. 닭의 경우에서도 김제, 완주 등이 속한 격자(Cell ID)에서는 평균 암모니아 농도보다 높은 날이 총 34회로 나타났으며, 나주시, 영암군 등이 속한 격자에서 11회가 발생함.

〈그림 4-10〉 축종별 총 사육 마릿수 분포(2021~2025)



자료: 가축위생방역지원본부 내부자료(FAHMS)와 R-Studio를 활용하여 저자 작성.

〈표 4-1〉 축종별 사육 마릿수 및 평균 암모니아 농도 초과 일수(2021~2025)

단위: 천 두

축종구분	격자번호	총 사육 마릿수	주요 지역(시·군·구)	평균 농도 초과 일수
소	516	821	안성, 진천, 천안(서북구)	59
	383	765	구미, 김천	51
	147	735	나주, 영암, 함평	11
	471	712	괴산, 증평, 진천	42
돼지	440	4,554	서산, 예산, 홍성	8
	302	3,772	김제, 완주, 익산, 전주(덕진구)	34
	541	3,483	안성, 여주, 음성, 이천	18
	564	3,218	여주시, 이천시	2
닭	302	53,249	김제, 완주, 익산, 전주(덕진구)	34
	147	48,112	나주, 영암, 함평	11
	541	41,485	안성시, 여주시, 음성군, 이천시	18
	375	41,060	논산시, 부여군	12

주 1) 총 마릿수는 2021년부터 2025년까지의 마릿수를 합산한 값을 사용함.

2) 지역(시·군·구)은 격자로 구축된 공간을 기준으로 하며, 각 격자에 부분적으로 포함된 행정구역의 의미함.
 자료: NASA(검색일: 2025. 10. 21.), EARTHDATA - TROPES C₁S(JPSS-1) 위성 자료와 가축위생방역지원본부 내부자료(FAHMS)를 활용하여 저자 작성.

2.3. 축종별 농가당 사육 마릿수 분포

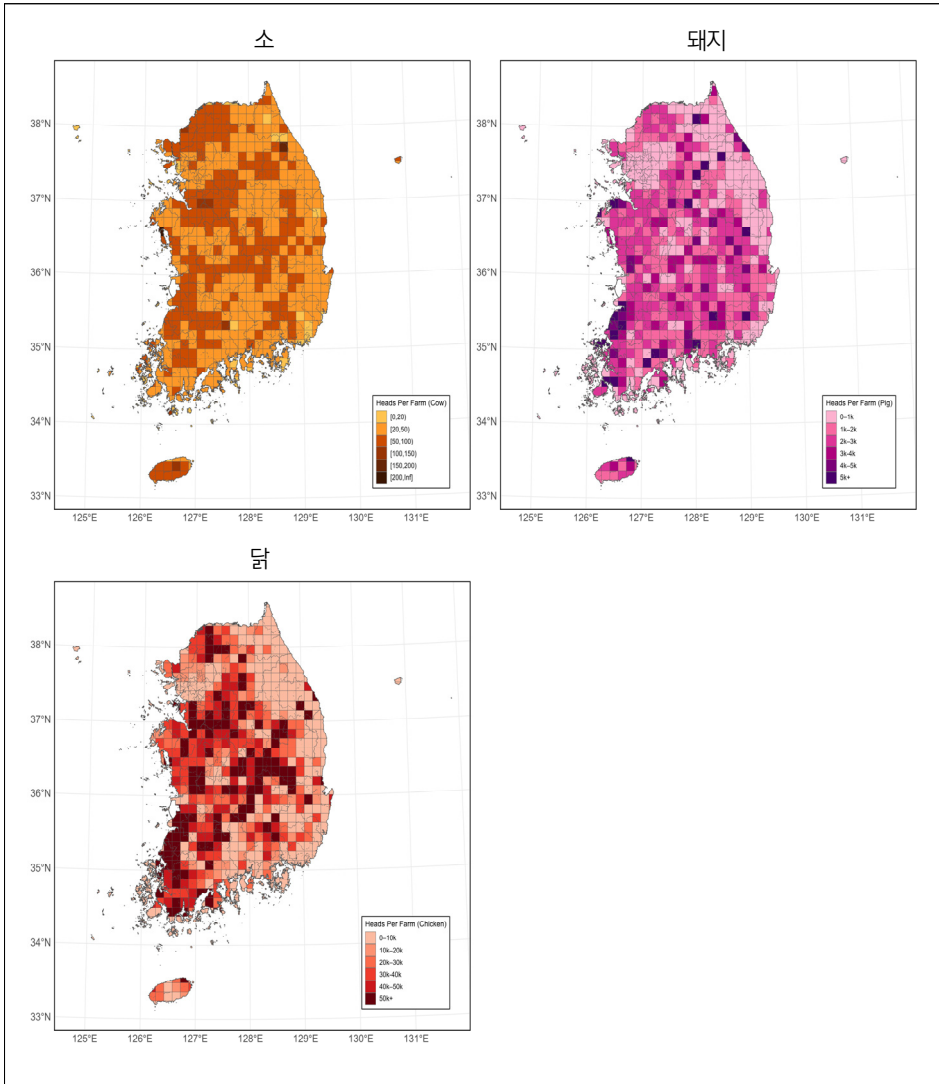
○ 본 연구에서는 축종별 농가당 사육 마릿수를 주요 변수로 사용하여, 축산농가의 규모화와 암모니아의 관계를 분석하였음. 〈그림 4-9〉는 농가당 사육 마릿수를 주요 축종별로 격자 단위로 나타냈으며, 앞선 표와 같이 위성 관측자료가 존재한 격자를 중심으로 〈표 4-2〉에서는 농가당 사육 마릿수와 평균 농도 초과 일수를 제시함.

○ 소의 농가당 사육 마릿수, 즉 집약도는 경기 남·북부와 전북 일부 지역의 격자에서 높게 나타났음. 〈표 4-2〉에서의 소의 사육집약도가 가장 높은 격자(218)는 구례군, 남원시, 하동군, 함양군이 포함되며, 평균 암모니아 농도 초과 일

수 또한 22회로 높게 나타났음. 격자 번호 13에 속한 제주시, 서귀포시 일부에서도 농가당 사육 마릿수가 높았으며, 평균 농도 초과 일수 또한 12회로 나타남. 안성시, 진천군, 천안시(서북구)가 속한 격자 516에서는 격자 13과 같은 집약도(103두/호)를 나타냈지만, 평균 농도 초과 일수는 59회로 상대적으로 많은 횟수를 나타냄.

- 돼지 집약도가 높은 두 개의 격자(166, 165)는 무안군, 신안군을 공통으로 포함하고 있으며, 평균 암모니아 농도 초과 일수가 각각 1, 2회로 적은 누적 횟수를 보임. 이에 반해, 보성군, 순천시, 화순군 일부가 포함된 격자(151)에서 높은 집약도(8,038두/호)와 많은 초과 일수(25회)를 보임. 닭의 경우에는 격자 444에서 농가당 사육 마릿수가 26만 두로 가장 많았으며, 농도 초과 일수 또한 56회로 높게 나타났음. 또한, 군산, 김제, 부안군이 포함된 격자(300)와 가평, 포천시가 포함된 격자(674)에서 높은 집약도와 각각 5, 19회의 농도 초과 일수가 나타남.

〈그림 4-11〉 축종별 농가당 사육 마릿수(2021~2025)



자료: 가축위생방역지원본부 내부자료(FAHMS)와 R-Studio를 활용하여 저자 작성.

〈표 4-2〉 축종별 농가당 사육 마릿수 및 평균 암모니아 농도 초과 일수(2021~2025)

단위: 두/호

축종구분	격자번호	농가당 사육 마릿수	주요 지역(시·군·구)	평균 농도 초과 일수
소	218	108	구례군, 남원시, 하동군, 함양군	22
	13	103	서귀포시, 제주도	12
	516	103	안성시, 진천군, 천안시 서북구	59
	515	102	아산시, 안성시, 천안시 서북구, 평택시	8
돼지	166	8,584	무안군, 신안군, 함평군	1
	165	8,513	무안군, 신안군	2
	151	8,039	보성군, 순천시, 화순군	25
	611	7,427	평창군, 횡성군	1
닭	444	264,542	공주시, 세종시, 청주시 흥덕구	53
	300	116,248	군산시, 김제시, 부안군	5
	674	110,749	가평군, 포천시	19
	245	103,002	의령군, 창녕군, 함안군	4

주 1) 농가당 사육 마릿수는 총 사육 마릿수에서 총 농가 수를 나눈 값을 사용함.

2) 지역(시·군·구)은 격자로 구축된 공간을 기준으로 하며, 각 격자에 부분적으로 포함된 행정구역을 의미함.
 자료: NASA(검색일: 2025. 10. 21.), EARTHDATA - TROPES C₁S(JPSS-1) 위성 자료와 가축위생방역지원본부 내부자료(FAHMS)를 활용하여 저자 작성.

○ 암모니아, 축산활동 등 주요 변수들의 기초자료를 활용하여 이들의 시간적·공간적 특성을 파악하였음. 이를 바탕으로 암모니아와 축산활동 간의 관계를 정량적으로 추정하기 위해 계량모형 분석을 수행하고자 함.

3. 분석모형

3.1. 패널데이터 분석

○ 본 연구는 축산업과 암모니아 간의 관계를 분석하기 위하여 2021년 1분기에서 2025년 2분기까지의 패널데이터(Panel Data)를 구축하여 이중 고정효과 모형(Two-Way Fixed Effect Model)을 사용하였음. 이는 격자 단위로 형

성된 위성 관측 암모니아 농도, 축산농가의 특성(축종별 마릿수, 농장당 사육 마릿수), 기상관측 데이터를 연구에 활용하는 데 적합함. 본 연구에서 사용된 변수들의 기초통계량은 부록 1에 별도로 제시함.

- 이중 고정효과(Two-Way Fixed Effects: TWFE) 모형은 격자별 고정효과를 통해 지형, 토지이용 등 시간에 따라 변하지 않는 격자 고유의 특성을 통제하고, 시간 고정효과를 통해 계절성, 연도별 기후 및 정책변화에 대한 변화 등 격자 전체에 공통적으로 작용하는 시간적 요인을 통제하여 독립변수가 종속 변수에 어떠한 영향을 미치는지 추정하는 데 적합함. 식(4.1), (4.2)는 각각 축산활동과 암모니아 관련 변수 사이의 상관관계를 추정함.⁷⁾

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 \sum_s (Hheads_s \times EF_s^{NH3})_{it} + \beta_2 X_{it} + \gamma_i + \delta_t + \epsilon_{it} \quad \text{식(4.1)}$$

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 \left(\sum_s (Hheads_s) / farms \right)_{it} + \beta_2 X_{it} + \gamma_i + \delta_t + \epsilon_{it} \quad \text{식(4.2)}$$

- 분석모형에서 i 는 격자 단위, t 는 분기별 단위의 데이터를 사용하였음. 종속 변수(Y_{it})는 위성 관측 기반 격자별 암모니아(NH_3) 평균 농도 초과 일수를 연구에 사용하였음. 축산농가 데이터 특성상 분기별로 축종별 마릿수($Hheads_s$)가 조사 및 구축되어, 이를 연구에 활용하기 위해 암모니아(NH_3) 평균 농도 초과 일수를 종속변수로 활용함.
- 축산업 변수는 식(4.1)에서는 공간 격자에서 배출되는 축종별 암모니아 배출량을 사용하였으며, 이는 축종별 마릿수($Hheads_s$)와 축종별 암모니아 배출계수(EF_s^{NH3})를 곱하여 산정하였음. 축종별 암모니아 배출계수는 국가 대기오

7) 식(4.1)에서는 주요 축종별로 암모니아 배출량이 상이하므로, 축종별 사육 마릿수에 배출원(축종별) 단위 암모니아(NH_3) 배출계수를 곱하여 계수를 추정함.

염물질 배출량 산정방법 편람(VII)⁸⁾에서의 소분류 또는 세분류의 암모니아 배출계수로 활용함.

- 예를 들어 축종이 소일 경우, 한·육우와 젖소는 각각 다른 배출계수를 연구에 사용하였으며, 닭도 산란계와 육계를 구분하여 고유의 배출계수를 해당 마릿수에 곱해 암모니아 배출량을 산정함.

○ 또한, 식(4.2)에서는 축산농가의 규모화를 축산업 변수로 활용하기 위해 축종별 농가당 사육 마릿수를 변수로 사용하였음. 이는 격자별로 하나의 축산농가에서 몇 마리의 가축을 사육하는지를 의미하며, 축종별 사육밀집도를 나타냄.

○ 기상변수(X_i)는 지상관측소의 시간별 기온, 강수량, 바람의 세기를 일정한 기준에 따라 분기 내 발생 일수를 집계하여 분석에 활용함. 기상변수 또한 종속변수와 마찬가지로 축산업 변수와의 시간해상도(Temporal resolution)를 일치시키기 위해서 발생 일수를 집계하여 연구에 활용함.

○ 또한, 격자 고정효과(γ)를 모형에 포함하여, 격자별 지형적 특성, 지리적 위치 등 자료로는 관측하기 어려운 고유의 특성 및 장기적으로 변하지 않은 요인을 통제함. 시간 고정효과(δ)는 계절성, 국내 기후 조건의 변화 및 위성 관측 여건의 변화 등 특성 시점에 공통적으로 미치는 요인들을 통제하여, 추정치의 편의를 제거함.

○ 본 연구에서는 격자 고정효과(γ)와 시간 고정효과(δ)를 함께 포함한 패널모형을 활용함. 격자 고정효과는 지형, 토지이용 구조 등 격자별로 시간에 따라 변하지 않는 공간적 특성을 통제하며, 시간 고정효과는 계절성, 전국적 기후 충격 및 위성 관측 여건의 변화 등 특정 시점에 공통적으로 영향을 미치는 요인을 통제하였음.

⁸⁾ 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 참고.

4. 분석 결과

4.1. 축산활동과 암모니아 농도 초과 일수

- 본 연구에서는 격자-분기 단위의 패널데이터를 구축하여 암모니아와 축산활동 간의 관계를 이중 고정효과(TWFE) 모형으로 추정함. 이중 고정효과모형에서는 격자-시간 고정효과(Fixed Effect)를 모형에 포함하여, 격자별 고유의 특성과 공통적인 시간 요인을 충분히 통제하여, 추정치의 편의(bias)를 줄이며 신뢰성 있는 계수 추정을 가능하게 함.
- <표 4-3>은 식(4.1)에 제시된 분석모형에서 축산활동 변수만 이용하여 추정한 결과로, 축산활동과 암모니아 간의 상관관계를 이중 고정효과(TWFE) 모형의 추정 결과를 통해 정량적으로 보여줌.
- 주요 분석 결과를 살펴보면, 축종별 암모니아 배출량에서 소 부문은 이중 고정효과모형에서 계수값이 0.358로 추정되었으며, 1% 유의 수준에서 통계적으로 유의하게 나타났음. 이 계수는 격자 내에서 시간(분기)에 따라 소 사육 규모 증가로 인해 암모니아 배출량이 1톤 증가할 경우, 위성 관측 기반 암모니아 평균 농도 초과 일수가 0.36회 증가함을 의미함.
 - 즉, 젖소의 암모니아 배출계수⁹⁾를 기준으로 할 때, 약 163마리의 젖소가 증가할 경우, 농도 초과 일수가 0.36일 증가하는 것을 의미함.
- 돼지 부문의 경우, 이중 고정효과모형에서는 계수값이 0.004로 양(+)이면서 작게 나타났으며, 통계적으로 유의하지 않았음. 이는 돼지 사육 활동의 변화가 암모니아 농도 초과 일수에 대해 독립적으로 설명하는 힘이 약함을 의미함.

⁹⁾ 젖소 1마리당 암모니아 배출계수: 24.6 kg/마리·year.

- 이러한 결과는 돼지 사육 형태(밀폐형 축사)와 환경관리 조치(환기·세정 시설, 암모니아 저감 장치 등)가 적용되고 있는 점과 관련이 있을 가능성이 있음. 이에 따라 돼지 사육 마릿수와 암모니아 평균 농도 초과 일수의 상관관계가 뚜렷하지 않으며, 직접적 연계성도 제한적으로 나타남.
- 닭 부문의 암모니아 배출량 계수값은 -0.008로 추정되었으며 통계적으로 유의하지 않음. 이는 닭의 사육 마릿수 변화가 위성 데이터 기반 암모니아 농도 초과 일수에 미치는 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았음을 의미함.
- 이 분석 결과는 닭 사육의 구조적 특성을 통해 설명할 수 있음. 대규모 산란계 농가의 경우, 밀폐형 축사와 기계식 환기시스템의 보편화로 사육 마릿수 변화가 암모니아에 미치는 영향이 상대적으로 적을 수 있음. 또한, 단기간 사육이 이루어지는 육계의 경우, 암모니아 배출이 분산되기 때문에 정확한 효과를 확인하기 어려움.
- <표 4-3>의 고정효과모형 분석 결과는 암모니아와 축종별 사육의 구조적 특성과 밀접하게 관련된 것으로 해석됨. 소(한·육우, 젖소)는 개방형 또는 반개방형 축사에서 사육하여, 축사 내부에서 발생한 암모니아가 대기 중으로 직접 확산하기 쉬운 구조임. 또한, 소의 분뇨는 노출된 축사의 바닥, 야외 퇴비장, 개방형 액비 저장소 등 장시간 저장 및 발효하는 경우가 많으므로 지속해서 암모니아 배출원으로 작용함. 그 결과 소를 사육하는 활동이 다른 축종에 비해 평균 암모니아 농도 초과 일수가 가장 일관되고 뚜렷한 양(+)의 상관관계를 가지는 것으로 해석할 수 있음.

〈표 4-3〉 암모니아와 축산활동 분석 결과

모델	고정효과모형
소 (암모니아(NH ₃) 배출량)	0.358*** (0.134)
돼지 (암모니아(NH ₃) 배출량)	0.004 (0.019)
닭 (암모니아(NH ₃) 배출량)	-0.008 (0.027)
격자 고정효과	Yes
시간 고정효과	Yes
관측치 수	1,688
Adjusted R ²	0.602

주 1) RStudio 프로그램을 이용하여, 최소자승법과 이중 고정효과모형으로 추정함.

2) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

4.2. 기상요건을 고려한 축산활동과 암모니아 농도 초과 일수

○ 대기 중 암모니아는 기온, 풍속, 강수량 등 기상 요인에 의해 영향을 받을 수 있으므로, 본 연구에서는 각 기상 요인을 일정한 기준값에 따라 구간을 설정하여, 해당 기상 조건의 분기 내 발생 일수를 변수로 구성하여 분석에 활용함.

- 기온을 0°C 미만, 0~15°C, 15~25°C, 25°C 이상으로, 풍속을 1m/s 미만, 1~2m/s, 5m/s 이상으로, 상대습도를 70% 이상으로, 강수량을 강수 발생 여부(0mm 초과)와 집중 강수(5mm 이상)로 구분하여 각 조건의 분기 내 발생 일수를 변수로 구성함.

○ 〈표 4-4〉는 기상요건을 고려하여 암모니아와 축산활동의 상관관계를 이중 고정효과모형으로 식(4.1)을 통해 추정된 결과를 제시함. 모형의 설명력을 나타내는 Adjusted R²는 0.602로 비교적 높은 수준을 보이며, 본 모형이 종속 변수의 변동을 상당 부분 설명하고 있음을 시사함.

- 축종별 결과에서는 소 부분의 암모니아 배출량은 이중 고정효과모형에서 0.364로 추정되었으며, 1% 수준에서 통계적으로 유의하게 나타났음. 소를 사육하여 발생하는 암모니아 배출량이 증가할수록, 격자 내 암모니아 평균 농도 초과 일수가 증가하는 것으로 나타남.
 - 소의 사육 마릿수 증가로 암모니아 배출량이 1톤 증가할 경우, 암모니아 평균 농도를 초과하는 일수가 약 0.364일 증가하는 경향이 있음을 의미함. 이는 소를 사육하는 과정이 장시간·상시적으로 이루어지며, 분뇨 저장 및 처리하는 과정에서 지속적으로 암모니아의 배출원이 된다는 점과 부합함.

- 반면에 돼지와 닭 부분의 암모니아 배출량은 이중 고정효과(TWFE) 모형에서는 통계적으로 유의하지 않았음. 이는 <표 4-4>에서 사용한 모형에서 기상 요인을 통제된 상황에서도 돼지와 닭 부분의 사육 규모 변화로 인한 암모니아 배출량이 암모니아 농도 초과 일수의 변동을 설명하는 데 한계가 있음을 확인함.
 - 이러한 결과는 앞서 설명한 돼지와 닭의 사육이 밀폐형 축사에서 이루어지고, 환기 및 저감 시설이 존재하는 등 사육구조의 특성과 밀접하게 관련된 것으로 해석할 수 있음.

- 기상 요인의 개별 효과를 살펴보면, 이중 고정효과(TWFE) 모형에서 기온을 나타내는 고온 및 폭염 조건에서 각각 10%, 5% 수준에서 통계적으로 유의한 양(+)의 상관관계가 나타남. 각 계수의 추정치는 고온 조건이 0.017, 폭염 조건이 0.027로 나타나, 폭염 조건의 추정치가 더 크게 나타남. 즉, 폭염 조건의 일수가 많을수록, 대기 중 평균 암모니아 농도를 초과하는 일수가 증가하는 경향을 보임.
 - 기온 상승은 토양 및 가축분뇨 등에서 암모니아(NH₃)의 휘발을 촉진하여, 대기 중 암모니아 농도를 증가시킨다는 Pedersen et al.(2021)의 결과와 일치함.

- 또한, 이중 고정효과(TWFE) 모형에서 강한 강수의 추정치는 -0.087 로 나타났으며, 10% 유의 수준에서 통계적으로 유의하다고 나타남. 이는 집중 강수가 발생하는 일수와 대기 중의 암모니아 농도가 평균을 초과하는 일수는 서로 음(-)의 상관관계가 있다고 할 수 있음. 즉, 비가 많이 내리면 대기 중 암모니아를 제거하거나 더 넓은 공간으로 확산시켜 농도가 낮아지도록 함.¹⁰⁾
- <표 4-4>를 통해 기상요건을 고려한 상관관계 분석에서는 단기적인 확산 조건보다는 소의 사육 마릿수 증가로 인한 암모니아 배출 규모 확대와 기온 조건이 암모니아 농도 초과에 더 중요한 요인임을 시사함.

¹⁰⁾ 다른 기상 요인으로서 풍속과 습도 변수를 모형에 포함하였지만, 해당 모형에서는 유의하지 않은 것으로 나타남.

〈표 4-4〉 기상요건을 고려한 암모니아와 축산활동 분석 결과

모델	고정효과모형
소 (암모니아(NH ₃) 배출량)	0.364*** (0.134)
돼지 (암모니아(NH ₃) 배출량)	0.005 (0.019)
닭 (암모니아(NH ₃) 배출량)	-0.011 (0.027)
저온 발생	0.003 (0.008)
온화 기온 발생	0.007 (0.006)
고온 발생	0.017* (0.010)
폭염 발생	0.027** (0.012)
무풍 발생	-0.002 (0.005)
약풍 발생	0.002 (0.005)
강풍 발생	-0.005 (0.011)
고습 발생	-0.001 (0.004)
강수 발생	0.001 (0.010)
강한 강수 발생	-0.087* (0.048)
격자 고정효과	Yes
시간 고정효과	Yes
관측치 수	1,688
Adjusted R ²	0.602

주 1) RStudio 프로그램을 이용하여, 최소자승법과 이중 고정효과모형으로 추정함.

2) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

4.3. 농가 수 및 농가당 사육 마릿수와 암모니아 농도 초과 일수

- 앞선 분석에서는 축종별 마릿수와 암모니아 배출계수를 활용하여 축산활동의 암모니아 배출량을 산정하여 배출의 규모효과를 확인하였음. 그러나 축산부문의 대기오염은 배출 총량뿐만 아니라, 최근 사육의 규모화로 축산농가 단위의 사육 집중도가 높아지면서 이를 분석할 필요가 있음.
 - 농가 단위의 사육 집중도는 농가당 사육 마릿수를 변수로 사용하였으며, 가축의 생물학적 특성과 사육방식 및 암모니아 배출 특성의 차이 등에 따라 축종별로 구분하여 분석에 활용함.
- <표 4-5>에서는 축종별 농가 수 또는 농가당 사육 마릿수가 평균 암모니아 농도 초과 일수와의 상관관계를 TWFE 모형을 사용하여 추정한 결과를 제시함. 앞선 분석과 같이 기상 요인 변수들을 통제변수로 사용함.
- 우선 축종별 농가 수(Number of Farms)를 사용한 분석에서는 세 가지 축종에서 통계적으로 유의한 관계가 나타나지 않았지만, 사육의 규모화를 나타내는 농가당 소의 사육 마릿수는 평균 암모니아 농도 초과 일수와 통계적으로 유의미한 양(+)의 상관관계가 있다고 나타남.
 - 농가당 소 사육 마릿수가 1두 증가할 때, 평균 암모니아 농도 초과 일수는 0.031회 증가한다고 해석할 수 있음. 기상 요인은 기온이 따뜻하거나 더운 날과 암모니아 농도 초과 일수는 양의 상관관계를 가지면서, 더운 날의 계수값이 더 크게 나타났음. 또한, 강수량이 많은 날에는 암모니아 농도 초과 일수가 줄어들음.
- 돼지와 닭의 경우 농가 수 또는 사육밀도가 통계적으로 유의하지 않게 나타났으며, 이는 위성 데이터를 통한 암모니아 관측자료는 상대적으로 배출 규모가 크고, 가축분뇨의 저장 및 처리 과정의 특성을 반영한 결과로 해석할 수 있음.

○ <표 4-5>의 분석 결과는 암모니아 배출이 단순히 ‘농가 수’보다 ‘농가 수준의 사육밀도(Intensity)’에 의해 결정될 수 있음을 보여줌.

- 이는 농·축산부문의 암모니아 배출관리정책이 축산농가 수 자체를 감소시키는 접근보다 대규모 사육 농가를 중심으로 배출 저감 정책에 초점을 둘 필요가 있음을 시사함.

<표 4-5> 농가 수 및 농가당 사육 마릿수와 평균 암모니아 농도 초과 일수 TWFE 분석 결과

모델	고정효과모형	
	농가 수 (1)	농가당 사육 마릿수 (2)
소	0.010 (0.008)	0.031* (0.018)
돼지	0.011 (0.059)	-0.00002 (0.0002)
닭	-0.016 (0.022)	0.000004 (0.00001)
저온 발생	0.002 (0.008)	0.003 (0.008)
온화 기온 발생	0.006 (0.006)	0.006 (0.006)
고온 발생	0.017* (0.010)	0.018* (0.010)
폭염 발생	0.028** (0.012)	0.028** (0.012)
무풍 발생	-0.002 (0.005)	-0.001 (0.005)
약풍 발생	0.003 (0.005)	0.002 (0.005)
강풍 발생	-0.005 (0.012)	-0.005 (0.012)
고습 발생	-0.001 (0.004)	-0.001 (0.004)
강수 발생	0.001 (0.010)	0.002 (0.010)
강한 강수 발생	-0.080* (0.048)	-0.082* (0.048)
격자 고정효과	Yes	Yes
시간 고정효과	Yes	Yes
관측치 수	1,688	1,688
Adjusted R ²	0.601	0.601

주 1) RStudio 프로그램을 이용하여, 최소자승법과 이중 고정효과모형으로 추정함.

2) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

4.4. 분뇨 처리 시설을 포함한 암모니아 농도 초과 일수 분석

○ 가축을 사육하는 활동에 추가하여, 다른 농·축산업 변수로 가축분뇨 공공 처리시설의 개수와 시설용량을 모형에 추가하여 분석한 결과는 <표 4-6>과 같음. 주요 축산활동 변수의 통계치와 유의성은 앞선 결과와 유사하게 나타남.

- 하지만 공공분뇨처리시설의 수 또는 시설용량의 계수값은 양(+)으로 나타났지만, 초과 일수와 상관은 통계적 유의성이 없음. 이 결과는 주요 암모니아 배출원이 축사(사육 마릿수, 사육밀도)이기 때문에, 다른 부수적 요인들의 영향이 나타나지 않을 수 있음. 또한, 실제 분뇨처리량 데이터 또는 사설 분뇨처리시설 데이터의 부재로 인한 결과일 가능성이 있음.

<표 4-6> 분뇨처리시설 변수를 포함한 평균 암모니아 농도 초과 일수 고정효과모형 분석 결과

모델	고정효과모형			
	가축분뇨 공공 처리시설 개수		가축분뇨 공공 처리시설 용량	
	(1)	(2)	(3)	(4)
소 (암모니아(NH ₃) 배출량)	0.360*** (0.135)	- -	0.361*** (0.135)	- -
돼지 (암모니아(NH ₃) 배출량)	0.005 (0.019)	- -	0.005 (0.019)	- -
닭 (암모니아(NH ₃) 배출량)	-0.011 (0.027)	- -	-0.011 (0.027)	- -
소 (농가당 사육 마릿수)	- -	0.031* (0.018)	- -	0.031* (0.018)
돼지 (농가당 사육 마릿수)	- -	-0.00001 (0.0001)	- -	-0.00001 (0.0001)
닭 (농가당 사육 마릿수)	- -	0.000004 (0.000006)	- -	0.000004 (0.000006)
가축분뇨 공공 처리시설 개수	0.106 (0.345)	0.211 (0.344)	- -	- -
가축분뇨 공공 처리시설 용량	- -	- -	0.001 (0.003)	0.002 (0.003)
기상 통제변수	Yes	Yes	Yes	Yes
격자 고정효과	Yes	Yes	Yes	Yes
시간 고정효과	Yes	Yes	Yes	Yes
관측치 수	1,688	1,688	1,688	1,688
Adjusted R ²	0.642	0.641	0.642	0.641

주 1) RStudio 프로그램을 이용하여, 이중 고정효과모형으로 추정함.

2) 기상 요인은 앞선 모델에서 사용한 변수들을 동일하게 적용하였음(부록 1-1, 1-2).

3) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

4.5. 임계값(Threshold) 변경을 통한 강건성 검증

- 본 연구에서는 대기 중 암모니아 농도의 평균값을 초과한 일수를 종속변수로 사용함. 추가로 본 연구에서는 암모니아 고농도 발생 여부를 판단하는 임계값을 상위 25%로 설정하여 분석을 수행함. 즉, 대기 중 암모니아 농도가 전체 분포에서 상위 25%에 해당하면 고농도 발생으로 정의하고 이를 일수로 산정함.
- 사육 마릿수와 배출계수를 활용한 분석(식 (4.1))과 농가당 사육 마릿수(식 (4.2))를 축산활동 변수로 설정하여, 분석 결과는 <표 4-7>과 같이 나타남.
 - 우선 암모니아(NH_3) 배출량 분석 결과에서는 상위 25% 임계값을 적용한 경우, 이전의 임계값(평균)을 적용한 결과와 동일하게 소에서 배출한 암모니아와 암모니아 고농도 발생 여부 간의 통계적으로 유의한 양(+)의 상관관계를 보여줌. 또한, 기상 요인은 이전과 같은 부호 값과 통계적 유의성을 보여주면서, 계수의 크기가 더 확대되어 효과의 크기가 증가함.
 - 사육집약도의 결과를 살펴보면, 고농도 발생 임계값이 높아졌을 때, 소 사육 농가가 규모화될수록 고농도 발생 일수는 증가하는 경향이 나타남. 구체적으로 계수의 크기가 증가하였으며, 더 낮은 유의확률을 보이며, 통계적 신뢰도가 높아짐. 기상 요인의 계수값들도 증가하였으며, 일부는 통계적 유의성이 강화되었음.
- 임계값을 상향 조정한 경우에도 분석 결과는 일관되게 나타났으며, 이는 축산활동 변수(소)와 기상 요인(온도, 강수)이 암모니아 고농도 발생을 설명하는데 있어 안정적인 설명력을 갖는다는 점을 보여줌.

〈표 4-7〉 임계값 변경을 통한 주요 이종 고정효과모형 분석 결과

모델	고정효과모형			
	암모니아(NH ₃) 배출량		농가당 사육 마릿수	
	평균 (1)	상위 25% (2)	평균 (3)	상위 25% (4)
소	0.364*** (0.134)	0.357*** (0.129)	0.031* (0.018)	0.034** (0.018)
돼지	0.005 (0.019)	0.005 (0.018)	-0.00002 (0.0002)	-0.00004 (0.0002)
닭	-0.011 (0.027)	-0.011 (0.026)	0.000004 (0.00001)	0.00001 (0.00001)
저온 발생	0.003 (0.008)	-0.0004 (0.007)	0.003 (0.008)	-0.0004 (0.007)
온화 기온 발생	0.007 (0.006)	0.007 (0.006)	0.006 (0.006)	0.007 (0.006)
고온 발생	0.017* (0.010)	0.020** (0.010)	0.018* (0.010)	0.021** (0.010)
폭염 발생	0.027** (0.012)	0.032*** (0.012)	0.028** (0.012)	0.033*** (0.012)
무풍 발생	-0.002 (0.005)	-0.002 (0.004)	-0.001 (0.005)	-0.001 (0.004)
약풍 발생	0.002 (0.005)	0.001 (0.005)	0.002 (0.005)	0.001 (0.005)
강풍 발생	-0.005 (0.011)	-0.005 (0.011)	-0.005 (0.012)	-0.005 (0.011)
고습 발생	-0.001 (0.004)	-0.001 (0.004)	-0.001 (0.004)	-0.001 (0.004)
강수 발생	0.001 (0.010)	0.002 (0.009)	0.002 (0.010)	0.004 (0.010)
강한 강수 발생	-0.087* (0.048)	-0.095** (0.046)	-0.082* (0.048)	-0.090* (0.046)
격자 고정효과	Yes	Yes	Yes	Yes
시간 고정효과	Yes	Yes	Yes	Yes
관측치 수	1,688	1688	1,688	1688
Adjusted R ²	0.602	0.599	0.601	0.598

주 1) RStudio 프로그램을 이용하여, 이종 고정효과모형으로 추정함.

2) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

4.6. 클러스터(Cluster) 분석

- 본 연구의 주요 변수인 평균 암모니아 농도 초과 일수, 축산활동 변수, 기상 특성을 종합적으로 고려하여, 분석에 사용된 격자를 <그림 4-12>와 같이 암모니아 고·저농도 클러스터로 크게 두 개로 구분함.
- <표 4-8>의 클러스터별 고정효과모형 추정 결과, 암모니아 고농도 클러스터에서 평균 농도 초과 일수와 소 사육 관련 변수 간에 통계적으로 유의미한 양(+)의 상관관계가 나타남. 또한, 다른 축종에서는 유의미한 차이를 보이지 않음. 반면, 암모니아 저농도 클러스터에서는 유의한 관계가 확인되지 않음.
- 이는 암모니아 고농도 지역에서 소 사육 규모 및 집약도가 암모니아 농도 초과에 더 밀접하게 작용하고 있음을 시사함. 따라서 암모니아 농도, 축산활동 및 기상 요인을 종합적으로 고려한 군집에 따라 축산활동의 영향이 이질적으로 나타남을 시사함.

<표 4-8> 암모니아(NH₃) 고·저농도 클러스터(Cluster)별 고정효과모형 추정 결과

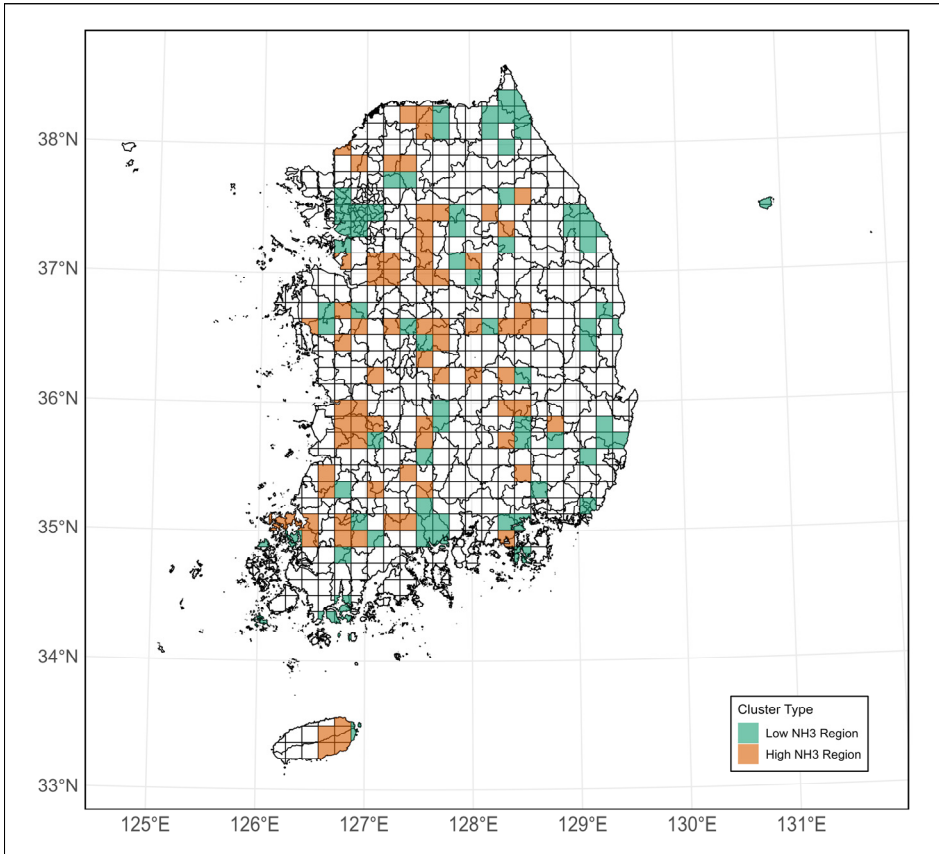
모델	고정효과모형			
	암모니아(NH ₃) 배출량		농기당 사육 마릿수	
	Low NH ₃ Region	High NH ₃ Region	Low NH ₃ Region	High NH ₃ Region
소	0.041 (0.189)	0.323* (0.169)	0.014 (0.02)	0.054* (0.032)
돼지	0.018 (0.050)	0.004 (0.019)	-0.0002 (0.0003)	-0.00004 (0.0002)
닭	0.029 (0.097)	-0.011 (0.024)	0.00001 (0.00001)	0.000003 (0.00001)
기상 통제변수	Yes	Yes	Yes	Yes
격자 고정효과	Yes	Yes	Yes	Yes
시간 고정효과	Yes	Yes	Yes	Yes
관측치 수	783	905	783	905
R ²	0.597	0.66	0.597	0.66

주 1) K-means clustering을 통하여 군집을 설정하였으며, 각각의 군집을 이중 고정효과모형으로 추정함.

2) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

〈그림 4-12〉 암모니아 고·저농도 지역의 공간적 군집(Cluster) 분류



주: 격자별 암모니아 농도, 축산활동 변수, 기상변수의 평균값을 고려하여 K-means로 분류한 결과임.
자료: NASA(검색일: 2025. 10. 21.), EARTHDATA - TROPES CrIS(JPSS-1) 위성 자료와 가축위생방역지
원본부 내부자료(FAHMS)를 활용하여 저자 작성.

5

요약 및 결론

1. 주요 분석 결과

- 본 연구의 사전 분석에서는 암모니아 위성 관측자료와 축산활동 관련 변수를 함께 제시하여, 주요 변수들의 시·공간적 특성을 살펴봄.
 - 분포와 기초통계량을 통하여 암모니아의 농도 또는 고농도 발생 일수가 높은 지역은 주로 축산활동이 활발한 지역임을 확인함.

- 정량적 분석으로 이중 고정효과모형(TWFE)을 활용하여 축산업 변수와 평균 암모니아 농도 초과 일수의 상관관계를 분석함.
 - 주요 변수 간의 상관관계를 분석한 결과, 주요 축종 중 소의 암모니아 배출량과 평균 암모니아 농도 초과 일수 간에 양(+)의 상관관계를 확인함.
 - 기존 분석모형에 기상 요인을 추가한 결과, 소에서 배출된 암모니아 영향은 같은 양(+)의 효과로 유지되었으며, 기온이 높은 날은 양(+), 강수량이 많은 날은 음(-)의 효과로 나타나 예상과 부합하는 결과가 나타남.

- 또한, 축산활동 변수로서 농가당 사육 마릿수를 활용하여, 소 축사가 규모화된 농가일수록, 초과 일수가 증가하는 양(+)의 상관관계를 확인함. 이는 규모화된 소 축산농가에서 발생하는 암모니아 배출이 대기 중 암모니아 농도 증가에 기여했을 가능성을 시사함.
- 축산업의 추가변수로 가축분뇨 공공 처리시설의 개수 및 시설용량을 분석에 포함하였으나, 추정치의 부호는 양(+)으로 나타났지만, 통계적으로 유의하지 않음.

2. 연구의 시사점

- 본 연구의 시사점은 일부 축사 또는 단일 지역을 연구대상으로 한 기존 연구와 달리 전국 단위의 암모니아 농도 자료를 수집 및 변환하여 연구를 수행하는 데 있음.
 - 이렇게 구축된 데이터는 초미세먼지(PM_{2.5})의 전구물질인 암모니아 농도를 포함하고 있어 축산환경 부문뿐만 아니라 대기오염 연구 등 다양한 환경 분야에 활용 가능한 확장성을 가짐.
- 본 연구는 축산농가 특성 자료와 위성 관측 기반의 암모니아 농도 자료를 결합하여, 축산활동과 암모니아 농도 간의 관계를 정량적으로 분석하였으며, 이는 향후 암모니아 저감 정책 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있음.
- 본 연구는 암모니아 위성 관측자료의 불균형 구조의 한계가 존재하지만, 국내 축산경제 연구에서 암모니아 위성 데이터를 활용하여 축산활동과 암모니아 간의 관계를 정량적으로 분석하였다는 점에서 의의가 있음. 이는 향후 암모니

아 저감 정책 수립을 위한 방향성을 제시하고, 기존 정책을 보완하기 위한 기초자료로 활용될 수 있음.

- 또한, 위성 데이터의 격자 단위 자료를 활용하여 더욱 정밀한 공간 데이터를 구축함으로써 기존 행정구역 기반 연구를 보완함.

○ 본 연구 분석 결과를 통해서, 주요 축종 중 소의 축산활동(사육 마릿수와 규모화)이 평균 암모니아 농도 초과 일수와 유의미한 양(+)의 상관관계를 확인함.

- 이는 소의 사육과정 및 분뇨 저장·관리·처리 과정에서 발생하는 암모니아에 대한 체계적 관리가 중요하며, 특히 규모화된 소 사육 농가를 중심으로 배출 저감 노력이 요구됨을 시사함.

- 기상 요인 중에서 기온이 암모니아에 유의미한 영향을 주는 것을 확인하였으며, 이는 암모니아의 휘발 특성을 반영한 것으로, 계절적 요인(봄·여름)을 고려한 암모니아 관리정책 마련의 필요성을 강조함.

3. 연구의 한계 및 향후 과제

○ 본 연구의 한계는 축산활동의 데이터가 분기별(Quarterly)로 구축되어, 낮은 시간적 해상도(Resolution)가 분석에 사용됨. 즉, 시간 단위의 암모니아 농도를 분기별 평균 농도 초과 일수로 변환함으로써, 실제 암모니아 농도 변화를 연구에 충분히 반영하지 못함.

○ 공간적인 한계로서 인공위성이 대한민국 모든 지역을 대상으로 농도 값을 측정하지 않아서, 모든 격자의 축산활동 데이터를 활용할 수 없었음. 이는 지역별 분석(Cluster)에서 충분한 표본 개수가 확보되지 않아 분석의 한계가 존재함.

- 본 연구에 사용한 암모니아 데이터는 지표 부문의 약취 세기(강도)를 대표하기에는 일정 부분 한계가 있으며, 다른 축산업 변수들의 시·공간적 데이터가 구축되지 않아, 해당 효과를 뚜렷하게 모형에서 알 수 없었던 한계가 있음.
- 향후 연구에서는 위성 관측데이터를 활용하여, 암모니아(NH_3) 농도와 대기 중 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도의 상관관계를 분석하여, 암모니아가 주요 전구물질로 작용하는지 확인하고자 함. 이를 통해 대기오염 저감을 위해서 암모니아 관리의 중요성에 대한 근거를 제시하고자 함.
- 추가로 축산업과 밀접한 대기오염물질인 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 황화수소(H_2S) 등의 자료를 수집하여, 축산업이 대기환경에 미치는 영향을 공간회귀분석을 통하여 정량적으로 분석하고자 함.

부 록 1

암모니아와 축산활동 관계 분석을 위한 기초통계량

〈부표 1-1〉 암모니아와 축산활동 변수의 기초통계량

변수명	기초통계량				
	평균	최소	최대	관측치 수	
평균 암모니아(NH ₃) 농도 초과 일수	3	0	26	1,688	
암모니아 배출량	소	8	0	49	1,688
	돼지	36	0	347	1,688
	닭	6	0	57	1,688
농기당 사육마릿수	소	50	0	121	1,688
	돼지	1,724	0	9,413	1,688
	닭	30,658	0	367,180	1,688
저온 발생	16	0	99	1,688	
온화 기온 발생	67	0	171	1,688	
고온 발생	62	0	178	1,688	
폭염 발생	25	0	158	1,688	
무풍 발생	48	0	169	1,688	
약풍 발생	64	1	150	1,688	
강풍 발생	5	0	111	1,688	
고습 발생	102	0	184	1,688	
강수 발생	34	2	99	1,688	
강한 강수 발생	1	0	14	1,688	

주: 본 연구 분석에 사용된 변수들이며, 소수 첫 번째 자리에서 반올림한 결과임.

자료: NASA, 가축위생방역지원본부, 기상청 자료를 결합한 분석 데이터의 기초통계량을 나타냄.

부 록 2

암모니아와 축산활동 간 관계에 대한 추가 실증분석 결과

〈부표 2-1〉 축산시설을 추가한 축산활동과 평균 암모니아 농도 초과 일수 분석 결과(1)

모델	TWFE Model	
	가축분뇨 공공 처리시설 개수	가축분뇨 공공 처리시설 용량
소 (암모니아(NH ₃) 배출량)	0.360*** (0.135)	0.361*** (0.135)
돼지 (암모니아(NH ₃) 배출량)	0.005 (0.019)	0.005 (0.019)
닭 (암모니아(NH ₃) 배출량)	-0.011 (0.027)	-0.011 (0.027)
가축분뇨 공공 처리시설 개수	0.106 (0.345)	-
가축분뇨 공공 처리시설 용량	-	0.001 (0.003)
저온 발생	0.003 (0.008)	0.003 (0.008)
온화 기온 발생	0.007 (0.006)	0.007 (0.006)
고온 발생	0.017* (0.010)	0.017* (0.010)
폭염 발생	0.027** (0.012)	0.027** (0.012)
무풍 발생	-0.002 (0.005)	-0.002 (0.005)
약풍 발생	0.002 (0.005)	0.002 (0.005)
강풍 발생	-0.005 (0.012)	-0.005 (0.012)
고습 발생	-0.001 (0.004)	-0.001 (0.004)
강수 발생	0.001 (0.010)	0.001 (0.010)
강한 강수 발생	-0.088* (0.048)	-0.087* (0.048)
격자 고정효과	Yes	Yes
시간 고정효과	Yes	Yes
관측치 수	1,688	1,688
Adjusted R ²	0.602	0.602

주 1) RStudio 프로그램을 이용하여, 이중 고정효과모형으로 추정함.

2) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

〈부표 2-2〉 축산시설을 추가한 축산활동과 평균 암모니아 농도 초과 일수 분석 결과(2)

모델	TWFE Model	
	가축분뇨 공공 처리시설 개수	가축분뇨 공공 처리시설 용량
소 (농가당 사육 마릿수)	0.031* (0.018)	0.031* (0.018)
돼지 (농가당 사육 마릿수)	-0.00001 -0.0001	-0.00001 -0.0001
닭 (농가당 사육 마릿수)	0.000004 -0.000006	0.000004 -0.000006
가축분뇨 공공 처리시설 개수	0.211 (0.344)	- -
가축분뇨 공공 처리시설 용량	- -	0.002 (0.003)
저온 발생	0.003 (0.008)	0.003 (0.008)
온화 기온 발생	0.006 (0.006)	0.006 (0.006)
고온 발생	0.018* (0.010)	0.018* (0.010)
폭염 발생	0.028** (0.012)	0.028** (0.012)
무풍 발생	-0.001 (0.005)	-0.001 (0.005)
약풍 발생	0.002 (0.005)	0.002 (0.005)
강풍 발생	-0.005 (0.012)	-0.005 (0.012)
고습 발생	-0.001 (0.004)	-0.001 (0.004)
강수 발생	0.002 (0.010)	0.002 (0.010)
강한 강수 발생	-0.082* (0.048)	-0.082* (0.048)
격자 고정효과	Yes	Yes
시간 고정효과	Yes	Yes
관측치 수	1,688	1,688
Adjusted R ²	0.601	0.601

주 1) RStudio 프로그램을 이용하여, 이중 고정효과모형으로 추정함.

2) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

〈부표 2-3〉 암모니아(NH₃) 고·저농도 클러스터(Cluster)별 고정효과모형 추정 결과

모델	고정효과모형			
	암모니아(NH ₃) 배출량		농가당 사육 마릿수	
	Low NH ₃ Region	High NH ₃ Region	Low NH ₃ Region	High NH ₃ Region
소	0.041 (0.189)	0.323* (0.169)	0.0139 0.0195	0.0536* 0.0322
돼지	0.018 (0.050)	0.004 (0.019)	-0.0002 0.0003	-0.00004 0.0002
닭	0.029 (0.097)	-0.011 (0.024)	0.00001 0.00001	0.000003 0.00001
저온 발생	0.010 (0.008)	-0.001 (0.010)	0.0098 0.0083	0.0012 0.0102
온화 기온 발생	0.003 (0.006)	0.010 (0.011)	0.0026 0.0059	0.0089 0.0113
고온 발생	0.012 (0.009)	0.015 (0.015)	0.0117 0.0088	0.0146 0.0153
폭염 발생	0.020* (0.012)	0.025 (0.019)	0.0206* 0.0115	0.0255 0.019
무풍 발생	-0.002 (0.006)	-0.002 (0.007)	-0.0007 0.0057	-0.0019 0.0065
약풍 발생	-0.004 (0.007)	0.011 (0.008)	-0.0035 0.0068	0.011 0.0074
강풍 발생	-0.014 (0.026)	0.024 (0.022)	-0.0141 0.0257	0.026 0.0223
고습 발생	0.000 (0.003)	-0.001 (0.006)	-0.00004 0.0035	-0.0012 0.0059
강수 발생	0.016 (0.010)	-0.021 (0.015)	0.0175* 0.0101	-0.0207 0.0152
강한 강수 발생	-0.048 (0.061)	-0.1003* (0.056)	-0.0473 0.0599	-0.0954* 0.0567
격자 고정효과	Yes	Yes	Yes	Yes
시간 고정효과	Yes	Yes	Yes	Yes
관측치 수	783	905	783	905
R ²	0.597	0.66	0.597	0.66

주 1) RStudio 프로그램을 이용하여, 이중 고정효과모형으로 추정함.

2) *, **, ***은 각각 유의수준 10%, 5%, 1%에서 통계적 유의성을 나타냄.

자료: 본 연구의 위성 데이터 암모니아 농도와 가축위생방역지원본부 자료를 이용한 분석 결과임.

참고문헌

- 국가데이터처(각 연도), 가축동향조사.
- 기후에너지환경부(2025), 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(VII).
- 농림축산식품부(각 연도), 농림업생산지수.
- 오세익·김수석·강창용(2001), 농업의 다원적 기능의 가치평가 연구, C2001-31, 한국농촌경제연구원.
- 이용건(2022), 축사시설 실태조사 분석 연구, C2022-5, 한국농촌경제연구원.
- 이용건·김형웅·승준호(2023), 탄소중립 실현을 위한 가축 사육단계 온실가스 감축 방안, R979, 한국농촌경제연구원.
- 정민국·이용건·최진용(2021), 축산업의 환경영향분석과 정책과제, R929, 한국농촌경제연구원.
- 정학균·박형호·임준혁(2023), 주요국 미세먼지 저감농업 정책, R995, 한국농촌경제연구원.
- Bai, Z. et al.(2022), "Relocate 10 billion livestock to reduce harmful nitrogen pollution exposure for 90% of China's population", *Nature Food*, 3(2): 152-160.
- Blanes-Vidal, V., E. S. Nadimi, T. Ellermann, H. V. Andersen & P. Løfstør m, (2012), "Perceived annoyance from environmental odors and association with atmospheric ammonia levels in non-urban residential communities: A cross-sectional study, *Environmental Health*", 11(27).
- Chanonsirivorakul, R. & N. Nimsuk(2020), Analysis of relationship between the response of ammonia gas sensor and odor perception in human, 2020 8th International Electrical Engineering Congress(IEECON).
- Ge, X., M. Schaap, R. Kranenburg, A. Segers, G. J. Reinds, H. Kros & W. de Vries (2020), "Modeling atmospheric ammonia using agricultural emissions with improved spatial variability and temporal dynamics", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(24).
- Hristov, A. N.(2011), "Technical note: Contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) in the United States", *Journal of Dairy Science*, 94(6).

- Kim, J., S. Seo, S.-E. Woo, J.-Y. Lee, Y.-A. Lee & J. Park(2024), “Distribution of air pollutant concentration and ammonium conversion rate in livestock areas: Focusing on Boryeong”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 46(10): 559-569.
- Kupper, T., C. Bonjour & H. Menzi(2015), “Evolution of farm and manure management and their influence on ammonia emissions from agriculture in Switzerland between 1990 and 2010”, *Atmospheric Environment*, 10: 215-221.
- Lunghi, J., M. Malpede & L. A. Reis(2024), “Exploring the impact of livestock on air quality: A deep dive into ammonia and particulate matter in Lombardy”, *Environmental Impact Assessment Review*, 105, 107456.
- Naseem, S. & A. J. King(2018), “Ammonia production in poultry houses can affect health of humans, birds, and the environment — techniques for its reduction during poultry production”, *Environmental Science and Pollution Research*, 25(16): 15269-15293.
- Pedersen, J., T. Nyord, A. Feilberg & R. Labouriau(2021), “Analysis of the effect of air temperature on ammonia emission from band application of slurry”, *Environmental Pollution*, 282, 117055.
- Rho, J. Y., S. M. Kang, G. E. Kim & E.-C. Jeon(2021), Method and characterization of ammonia emission estimation in open houses, *Journal of Climate Change Research*, 12(5): 505-513.
- Shim, C., J. Han, D. K. Henze, M. W. Shephard, L. Zhu, N. Moon, S. K. Kharol, E. Dammers, & K. Cady-Pereira(2022), “Impact of NH₃ emissions on particulate matter pollution in South Korea: A case study of the Seoul metropolitan area”, *Atmosphere*, 13(8), 1227.

〈온라인 자료〉

- 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr>), 검색일: 2025. 12. 9.~2026. 2. 9.
- 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>), 검색일: 2025. 11. 10.
- 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 누리집(www.air.go.kr), 검색일: 2025. 9. 17.
- 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터(<https://www.air.go.kr/capss/emission/year.do?menuId=30>), CAPSS 자료, 2025. 12. 31.~2026. 1. 5.
- 기후에너지환경부 홈페이지(<https://www.mcee.go.kr/>), 검색일: 2025. 9. 22.~2026. 2. 7.

축산경제신문(<https://www.chukkyung.co.kr/>), 검색일: 2025. 9. 22.
한돈뉴스(<https://www.pignpork.com/news/>), 2025. 9. 22.
EEA 홈페이지(<https://www.eea.europa.eu/>), 검색일: 2026. 1. 20.
EEA(<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/netherlands-air-pollution-country-2023-country-fact-sheets>), 검색일: 2026. 1. 20.
NASA(<https://www.earthdata.nasa.gov/>), 검색일: 2025. 10. 21.
US EPA(<https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-01/-PM%20NAAQS%202022%20-%20Standards%20-%20Fact%20Sheet.pdf>), 2026. 2. 5.

〈보도자료〉

축산신문(2025. 9. 24.), “K-축산, 질적 도약 … 지속가능 미래로”.

KREI

www.krei.re.kr



**위성 데이터 활용 축산업과
암모니아 농도 관계 분석 연구**

한국농촌경제연구원

전라남도 나주시 빛가람로 601 T.1833-5500 F.061) 820-2211



9 791161 498416
ISBN 979-11-6149-841-6