

## 고해상도 농경지 데이터를 이용한 비료사용 농경지의 암모니아 배출량의 시공간적 변화 분석

박진선 · 이세연\* · 홍세운\*\* · 나라\*\*\* · 오윤경\*\*\*\*

전남대학교 농업생명과학대학 기후변화대응 농생명 연구소, 학술연구교수

\*전남대학교 농업생명과학대학 지역·바이오시스템공학과, 석사과정

\*\*전남대학교 농업생명과학대학 지역·바이오시스템공학과 BK21, 기후변화대응 농생명 연구소, 조교수

\*\*\*전남대학교 농업생명과학대학 지역·바이오시스템공학과, 박사과정

\*\*\*\*전남대학교 농업생명과학대학 농업과학기술연구소, 학술연구교수

## Spatio-temporal Change Analysis of Ammonia Emission Estimation for Fertilizer Application Cropland using High-resolution Farmland Data

Park, Jinseon · Lee, Se-Yeon\* · Hong, Se-Woon\*\* · Na, Ra\*\*\* · Oh, Yungyeong\*\*\*\*

*Research Professor, AgriBio Institute of Climate Change Management, Chonnam National University*

*\*Master Student, Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University*

*\*\*Assistant Professor, Department of Rural and Biosystems Engineering BK21,*

*AgriBio Institute of Climate Change Management, Chonnam National University*

*\*\*\*Doctoral Student, Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University*

*\*\*\*\*Research Professor, Institute of Agricultural Science & Technology, Chonnam National University*

**ABSTRACT** : Ammonia emission from the agricultural sector contributes almost 78% of total ammonia emission in Korea. The current ammonia emission estimation method from fertilizer application has high uncertainty and needs to be improved. In this study, we propose an improvement method for estimating the amount of ammonia emission from agricultural land with improved spatiotemporal resolution using Farm Manager Registration Information System and criteria for the fertilizer. We calculated ammonia emissions by utilizing the 2020 cultivation area provided by Farm Manager Registration Information System for 55 kinds of upland crops cultivated in the field area of the farmland. As a result, soybeans were the most cultivated field crop in 2020, and the area of cultivated land was surveyed at about 77,021 ha, followed by sweet potatoes 22,057 ha, garlic 20004 ha, potatoes 17,512 ha, and corn 16,636 ha. The month with the highest ammonia emissions throughout the year was calculated by emitting 590.01 ton yr-1 in May, followed by 486.55 ton yr-1 in March. Hallim-eup in Jeju showed the highest ammonia emission at 117.50 ton yr-1.

**Key words** : Ammonia, Criteria for the Fertilizer, Emission, Farm Manager Registration Information

## I. 서 론

Corresponding author : Oh, Yungyeong  
Tel : +82-62-530-5182  
E-mail : yungyeong.oh@gmail.com

2019년 3월 26일 ‘미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별  
법’ 이 시행되면서 정부에서는 2022년까지 농축산분야

초미세먼지와 암모니아 배출량을 30% 감축하도록 목표를 설정하고 미세먼지 저감 대책을 마련하기 위해 여러 정책과 연구를 추진하고 있다. 환경부 보고에 따르면 농업잔재물 소각에서 전체 생물성 연소 미세먼지 배출의 63%에 해당하는 미세먼지가 발생하고 있으며, 농업기계에서 비도로 이동오염원 미세먼지 배출량 중 약 9%를 배출하고 있어, 농업부문에서 전체 미세먼지의 10% 정도를 배출하고 있는 것으로 평가하고 있다(Nam, 2019; Oh et al., 2020). 또한, 미세먼지 전구물질인 암모니아의 경우, 2015년 국내 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 기준으로 총 배출량의 78%를 농업부문에서 배출하고 있는 것으로 보고되고 있으며(Choi et al., 2019), 이 중 92%는 축산 분뇨, 8%는 비료 사용에 의한 농경지에서 주로 배출되는 것으로 보고되고 있다(ME, 2016). 그러나 국립환경과학원에서 수행한 DARS(Data Attribute Rating System) 평가에 따르면 농업 부분의 배출량의 불확도가 가장 높은 것으로 나타나 이에 대한 개선이 필요하다(Me et al., 2014; Song, 2021).

농업부문에서의 국내 암모니아 배출 연구를 살펴보면, 배출계수 개발을 위한 연구로 밭 토양에서 돈분 퇴비 시용방법에 따른 암모니아 배출 특성과(Lee et al., 2008; Yun et al., 2009) 논 토양에서의 암모니아 배출 특성 모니터링 연구(Kim et al., 2021), 시설재배지에서의 암모니아 배출량 산정(Song, 2021) 등 현장실험을 통한 암모니아 배출 특성에 관한 연구가 다양하게 수행된 바 있다. 반면, 활동도 자료 개선을 통한 암모니아 배출량 산정방법의 불확도 개선을 위한 연구로는 통계청에서 제공하는 작물별 재배면적과 작물의 표준재배법을 고려하여 암모니아 배출량의 시간 해상도를 높인 연구(Choi et al., 2019)가 이루어진 바 있다. 그러나 이 연구에서 활용된 활동도 자료 또한 하향식(Top down)으로 수집된 자료로 지역별 실제 농가의 작물재배 현황을 반영하는 데는 한계를 보였으며 상향식(Bottom up) 자료 수집의 필요성을 언급하였다.

따라서 본 연구에서는 상향식으로 수집되고 있는 농가경영체 등록정보를 활용하여 시공간 해상도를 높인 농경지 유래 암모니아 배출량을 산정하고 지역별 예상량을 분석하였다.

## II. 연구자료 및 방법

### 1. 연구의 범위

본 연구에서는 비료사용 농경지 중 밭 지역에서 노지 재배로 경작되고 있는 밭작물을 대상으로 농업경영체 등록정보에서 제공하는 2020년 재배면적을 활용하여 암모니아 배출량을 산정하였다. 공간적 분포는 현행 CAPSS에서 제공하는 시·군·구 단위에서 농업경영체 등록정보의 읍·면·동 단위로 공간해상도를 높여 산정하였다.

분석 대상 작물로는 55종의 노지재배 밭작물을 선정하였다. 이는 논에서 재배되는 작물에 비해 밭작물이 종류가 다양하고 작물별 비료사용량의 편차가 커 암모니아 배출량 산정의 불확도를 높이는 주요 요인이라 판단하였기 때문이다. 55종의 밭작물은 농촌진흥청에서 제공하는 80여 종의 노지 재배 작물에 대한 표준시비량 자료와 농업경영체 등록정보에 수집된 620여 종의 노지재배 작물 중 공통으로 수록된 작물을 기준으로 선정하였다. 이는 콩, 팥, 녹두, 강낭콩, 옥수수, 조, 수수, 메밀, 율무, 감자, 고구마, 수박, 참외, 토마토, 딸기, 메론, 오이, 호박, 가지, 배추, 양배추, 상추, 미나리, 시금치, 부추, 깻잎, 쑥갓, 갓, 근대, 아욱, 냉이, 고들빼기, 무, 당근, 연근, 양파, 대파, 고추, 마늘, 생강, 치커리, 케일, 비트, 아스파라거스 등이다. 본 연구에서 선정된 55종의 노지재배 작물은 근채류, 과일과채류, 과채류, 기타채소류, 서류, 엽채류, 조미채소류의 7종으로 구분되고, 각 대분류에 해당하는 세부 작물의 종류를 비율로 나타내면 Figure 1(a)와 같다.

### 2. 비료사용 농경지 암모니아 배출량 산정방법

국내 대기 중 오염물질 배출량 관리는 국립환경과학원 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System; CAPSS)에서 관할하고 있다(NIER, 2013). 따라서 본 연구에서는 CAPSS 시스템에서 적용하고 있는 비료사용 농경지의 암모니아 배출량 산정 방법(식(1))에 따라 암모니아 배출량을 산정하였다. CAPSS에서는 비료사용 농경지의 암모니아 배출을 투입한 비료의 질소함량 기준으로 배출계수에 연간 비료 사용량과 제품별 질소함량을 곱한 값을 시·군·구 단위로 제공하고 있다.

$$E = A \times N / 100 \times EF \quad (1)$$

여기서, E는 연간 암모니아 총 배출량 ( $\text{kg yr}^{-1}$ ), A는 비료 사용량 ( $\text{ton fertilizer yr}^{-1}$ ), N은 사용된 비료의 질소 함량 (%), 100은 질소함량의 단위 환산계수이며 EF는 암모니아 배출계수 ( $\text{kg NH}_3 \text{ ton}^{-1} \text{ N}$ )이다. 비료 종류별 배출계수는 Table 1과 같다.

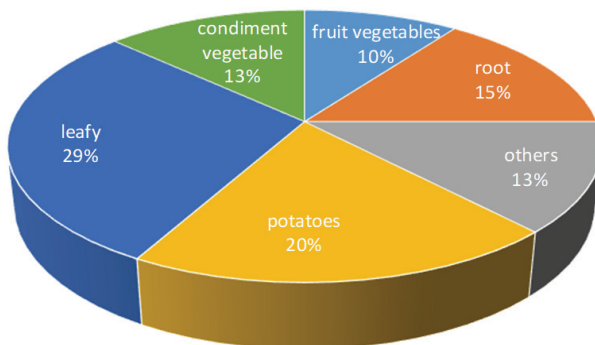
Table 1. Emission factor of ammonia by fertilizer type

Type of fertilizer	Emission factor (kg/ton)
Urea	141.5
Compound	75.2
Ammonium sulfate	97.0

### 3. 활동자료 구축

#### 가. 비료사용 농경지 암모니아 배출량 산정을 위한 작물 선정

현행 CAPSS는 시간 배분에 있어 월별 시비량 활동자료를 구축할 수 없기 때문에 농업생산기간을 4월~10월로 간주하여 연단위 활동자료를 통해 산출된 암모니아 배출량을 월별 시비량과 상관없이 균등 분배하여 월별 배출량을 산정한다. 그러나 작물별 파종 시기가 다르고, 비료 시비는 작물 파종 시기와 상관성이 높아 이를 반영하여 월별 배출량을 산정할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 55종의 작물별 파종 시기를 조사하고, 파종 시기에 비료를 시비하는 것으로 가정하였다. Figure 1(b)에서 보는 바와 같이 55종의 작물 중 4월과 5월에 파종하는 작물 종류가 11종으로 분석대상의 20%의 대상 작물의 파종시기가 집중됨을 알 수 있으며, CAPSS에서 고려하지 않는 2월과 3월에도 각각 4종, 7종의 작물이 파종되는 것으로 조사되었다.



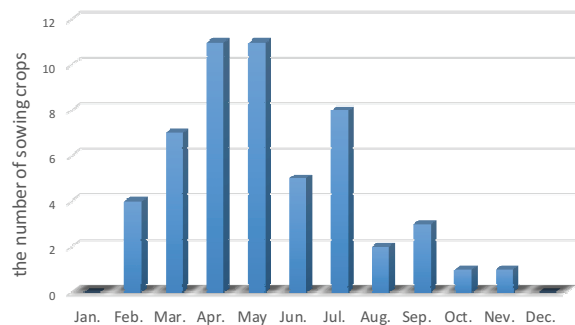
(a) Classification of objective crop

#### 나. 농업경영체 데이터베이스를 활용한 경지면적 자료 조사

현재 CAPSS에서는 환경부 제공 토지피복도 자료를 이용하여 식(1)에서 경지면적 변수로 활용하고 있으나, 토지피복도는 갱신 주기가 일정하지 않고 작물재배 정보를 제공하고 있지 않기 때문에 매년 변동되는 작물재배 현황을 반영하여 비료사용 농경지 유래 암모니아 배출량을 산정하는데 적합하지 않은 것으로 판단된다. 국가 제공 자료로는 통계청에서 공개하는 농업면적자료가 있으나, 공간해상도가 시군별로 공표되고 있어, 현재 시군별로 집계되고 있는 대기오염물질 배출량 통계의 집계 단위와 차이가 없으며, 일부 재배 작물종류가 표기되어 있지 않다는 한계를 갖는다. 반면, 농업경영체 등록정보는 읍면별 재배작물과 경작면적 자료를 제공하고 있어 시간 해상도와 공간해상도에서 유리하고, 비교적 최신 자료에 접근성이 양호하여 농업경영체 등록정보의 경지면적 자료를 수집하여 활용하였다.

#### 다. 표준시비량 기반 비료 시비량 추정

본 연구에서는 55종의 노지재배 작물에 투입되는 비료 사용량을 추정하기 위해 농촌진흥청에서 제공하는 표준시비량 자료를 활용하였다. 현행 CAPSS는 농업협동조합중앙회(농협)에서 제공하는 비료 판매량에 의존하여 농협에서 공급·판매한 비료량이 전량 농경지에 투입되었다고 가정하고 이 사용량을 연간 총 사용량으로 간주한다. 그러나 MAFRA(2017)에 따르면 농협을 통해 판매되는 비료량 이외에도 시판되는 복합비료량은 2015년 기준  $339,870 \text{ ton yr}^{-1}$ 으로 같은 해 농협 비료 판매량에 약 55%에 해당하는 양으로 추정된 바 있다(Choi et al., 2019). 따라서 농협 제공 비료 판매량에 기초한 암모니아 배출량 산정은 상당한 불확실성을 내포하고 있다.



(b) The number of sowing crops by month

Figure 1. Selected crop characteristics

Table 2. Characteristics of data for cropland

Database	Method	Resolution		Present condition	Reference
		Spatial	Temporal		
land-cover map	image processing	30m/5m/1m	irregular	2014/2018	Ministry of Environment
agricultural area	sampling	si, gun	annual	1975-2021	Kostat
Farm business registration information	surveying	Eup and myun	annual	2015-2020	Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs

본 연구에서는 작물 재배 시 요구되는 비료 사용량 (NAAS, 2017)을 기초로 암모니아 배출량을 추정하고자 한다. 농촌진흥청 제공 표준시비량 자료는 웹사이트에도 공개되어(<https://www.nongsaro.go.kr/portal/ps>) 열람할 수 있다. 표준시비량은 질소(N), 인(P), 칼리(K)를 기준으로 제공되며, 본 연구에서는 질소함량 21% 복합비료를 시비하는 것으로 가정하여 제공된 질소량을 복합비료량으로 환산하였다. 질소시비량을 투여 비료량으로 환산한 이유는 작물 및 토양 특성에 따라 질소고정 및 환원 효과가 상이하고, 투여된 질소가 모두 암모니아로 전환되는 것이 아니므로, 질소 시비량을 비료량으로 환산하는 것이 타당하다고 판단하였다. 이 때 N 시비량에 맞춰 환산하였기 때문에 P, K 시비량이 부족분이 발생하면 P, K 성분 단종 비료를 시비하는 것으로 가정하였다. 또한 본 연구에서 환산 적용한 시비량은 밀겨름과 웃겨름을 포함한 값이며, 퇴비 사용량은 고려하지 않았다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 밭작물 노지재배면적 특성

농업경영체 등록정보에 따르면 2020년 노지재배 밭작물 중 가장 많이 재배된 작물은 콩으로 약 77,021 ha 경작된 것으로 나타났으며, 다음으로는 고구마 22,057 ha, 마늘 20,048 ha, 감자 17,512 ha, 옥수수 16,636 ha 순으로 나타났다.

재배지역을 살펴보면 콩의 경우, 제주도 제주시 한림읍에서 약 2,500 ha, 전북 김제시 죽산면에서 1,711 ha, 전북 김제시 부량면에서 570 ha를 재배한 것으로 나타났으며, 고구마의 경우는 전남 해남군 산이면에서 468 ha, 전남 무안군 현경면에서 457 ha, 전남 해남군 화산면에서 451 ha로 전남지역에서 고구마가 많이 재배된 것으로 나타났다. 마늘은 제주도 서귀포시 대정읍에서 전국 생산면적의 6%인 1,185 ha 규모로 재배되는 것으로 조사되었고, 마늘 주산지인 경상북도 영천시 신녕면과 경남

창녕군 유어면에서 각각 465 ha, 420 ha 규모로 마늘이 경작된 것으로 나타났다. 감자는 전남 보성군 회천면에서 약 800 ha, 제주도 제주시 한림읍에서 604 ha, 강원도 홍천군 내면에서 495 ha의 규모로 경작된 것으로 나타났다. 옥수수는 충청북도 괴산군 청천면에서 224 ha, 강원도 평창군 평창읍에서 201 ha, 강원도 정선군 정선읍에서 201 ha로 비슷한 규모로 재배된 것으로 나타났다. 단일 읍면에서 대규모로 밭작물을 재배하는 경우를 살펴보면 제주도 서귀포시 대정읍과 한림읍에서 가을무를 각각 2,326 ha, 1,002 ha 경작하였고, 제주도 한림읍에서 당근도 1,020 ha 규모로 재배한 것으로 나타났다. 또한, 전남 무안군 해제면과 현경면에서 889 ha와 729 ha의 양파 경작이 이루어지는 것으로 조사되었다.

#### 2. 표준시비량을 기반으로 한 노지재배 작물 월별 암모니아 배출 추정량 산정 결과

표준시비량을 기반으로 한 노지재배 작물의 월별 암모니아 배출 추정량 산정 결과는 Figure 2와 같다. 연중 암모니아 배출량이 가장 많은 달은 5월로 590.01 ton yr<sup>-1</sup> 이 배출되는 것으로 산정되었고, 3월 486.55 ton yr<sup>-1</sup>, 9월

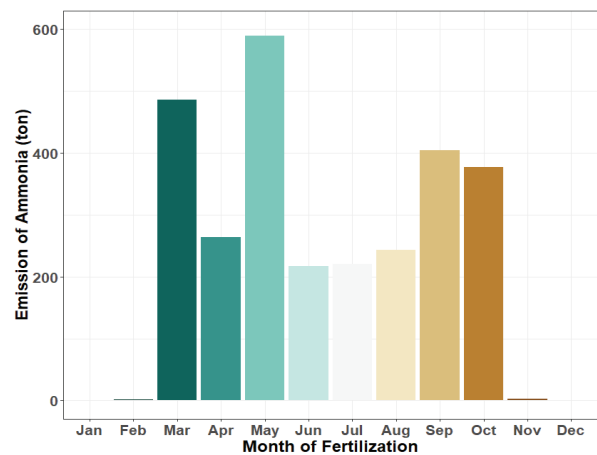


Figure 2. Monthly ammonia emission of fertilized cropland

404.59 ton yr<sup>-1</sup> 순으로 산정되었다. 3월과 5월은 농번기가 시작되는 달로 파종 작물의 종류가 다양해 작물 생산에 포함되는 경지면적이 넓고, 비료 사용이 활발하며, 9월은 양파, 김장배추 등 저장성이 높은 작물과 동절기 채소의 파종이 시작되는 시기로 비료 시비량이 늘어나기 때문으로 사료된다.

월별 산정 결과를 살펴 보면 2월은 파종작물의 4종류의 작물이 파종되나, 경지면적이 넓지 않아 암모니아 배출량 또한 1.921 ton으로 미미한 수준으로 추산되었다. 본격적인 농업생산기간으로 접어든 3월부터 암모니아 배출량은 급격히 증가하여 486.550 ton yr<sup>-1</sup>을 배출하는 것으로 추산하였다. 3월은 전체 월별 암모니아 배출량 추정량 중 두 번째로 배출 순위가 높은 것으로 나타났으나, 현행 CAPSS에서 배출량의 시간 배분에서는 4월~10월의 평균치를 적용하므로, 3월의 배출량은 고려되지 않고 있다. 시설재배에 따른 부분까지 포함한다면 3월 배출량은 더욱 늘어날 것으로 전망되어 CAPSS의 시간 배분에서 3월 배출량에 대한 적절한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

5월은 콩, 당근, 여름 무와 같이 노지재배에 의존하는 근채류 작물과 노지 상추 등 11종의 작물이 파종되는 것으로 조사되었고, 암모니아 배출량은 590.014 ton yr<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높은 값을 보였다. 콩의 경지면적은 약 77,000 ha로 55개 작물의 전체 경지면적인 약 24만 ha의 32%를 차지하고 있어 암모니아 배출량 산출 결과가 집중됨을 알 수 있다. 한편 4월 암모니아 배출량은 264.133 ton yr<sup>-1</sup>으로 5월과 동일하게 11종의 작물을 파종하나 배출량에서는 큰 차이를 보였는데, 4월에 주로 파종되는 작물이 오이, 토마토, 쪽갓 등으로 시설재배에 우세한 작물이 주를 이루고 있어 경지면적의 차이가 크게 작용한 것으로 판단된다. 7월, 8월은 여름배추, 양배추, 시금치, 김장배추와 같은 엽경채류의 파종이 활발하고, 암모니아 배출량은 220.23 ton yr<sup>-1</sup>, 243.37 ton yr<sup>-1</sup>으로 산정되었다. 9월과 10월은 양파, 마늘, 저장 무 등 봄에 수확하는 작물이 파종된다. 마늘과 양파 등은 작물 생육이 동절기에 이루어지기 때문에 경작 가능지역이 남부지역에 집중되는데, 경지면적이 마늘 20,047.77 ha, 양파 14,408.70 ha로 암모니아 배출량 또한 9월 404.56 ton yr<sup>-1</sup>, 10월 376.90 ton yr<sup>-1</sup>으로 하절기 감소했던 배출량이 반등하였다. 11월은 저장 무 1종만 파종되는 것으로 조사되었고, 경지면적은 107.94 ha로 암모니아 배출량은 2.27 ton yr<sup>-1</sup>으로 다른 달에 비해 극히 적은 것으로 나타났다. 12월은 파종되는 작물이 없어 암모니아 배출량이 산정되지 않았다. 다만 본 연구에서는 노지재배 작물을 대상으로 암모니아 배출량을 산정하였기 때문에 1월과 12월에 암모니아 배출이 없는 것으로 나타났지만, 전술한 바와 같이 시설재배를 포함하면 농업 생산에서 유래한 암모니아 배출은 연중 지속적으로 일어날 것으로 사료된다.

또한 질소 시비 요구량이 많은 작물은 부추 57

kg/10a, 브로콜리 43 kg/10a, 깻잎 41.8 kg/10a 순으로 조사 되었으나, 암모니아 배출량이 많은 작물은 경지면적이 상위에 있는 마늘 376.90 ton yr<sup>-1</sup>, 콩 376.48 ton yr<sup>-1</sup>, 양파 260.05 ton yr<sup>-1</sup>으로 분석되어, 경지면적과 질소 시비량 중 농업 생산 유래 암모니아 배출에 기여하는 인자는 경지면적이 우선하는 것으로 나타났다.

### 3. 노지재배 비료사용 농경지 암모니아 배출량 시·공간 분포 분석 결과

비료사용에 따른 암모니아 배출의 공간적 배분 결과는 Figure 3과 같다. 현행 CAPSS에서 암모니아 배출의 공간 배분은 비료 사용량 활동자료를 시군구별로 입수하여 산출하고, 환경부 제공 토지피복도를 활용하여 재배작물 종류와 무관하게 농경지 면적을 기준으로 읍면동 단위로 배분하여 배출량을 일괄 산정한다. 물론 농업 생산에서 발생하는 암모니아 발생량에 경지면적이 기여하는 부분이 크지만, 지역별 재배작물이 다르고, 작물 종류에 따른 질소 시비량과 계절별 시비 시기 차이 또한 크기 때문에 암모니아 배출량을 농경지 전체에 대해 일괄적으로 균등하게 배분하는 것은 무리가 있다. 이에 본 연구에서는 지역별 재배작물에 따른 비료 시비 시기를 반영하여 암모니아 배출에 대한 시·공간 분포를 분석하여 Figure 4와 같이 도시하였다.

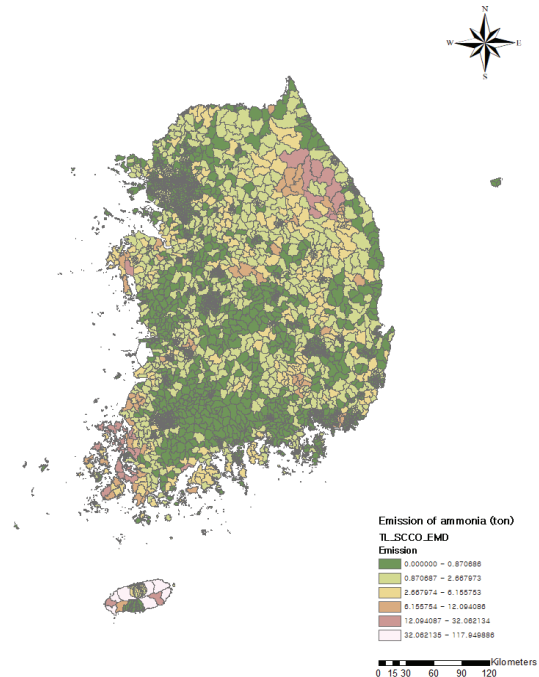


Figure 3. Spatial distribution of ammonia emission for fertilized cropland



강원 지역은 홍천군 내면의 암모니아 배출이 가장 높은 것으로 산정되었다. 홍천군 내면의 연간 암모니아 배출량은 22.99 ton yr<sup>-1</sup>으로 고랭지 무 생산에 투입되는 비료가 가장 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 강릉시 왕산면은 20.77 ton yr<sup>-1</sup>으로 산정되었고, 고랭지 배추 생산에 투입되는 비료가 가장 큰 원인이 되는 것으로 나타났다. 이는 Figure 4(e), (f)에서 보는 바와 같이 고랭지 채소가 파종되고 비료 시비가 집중되는 5월과 6월에 강원 지역에 암모니아 배출이 두드러짐을 알 수 있다. 강원 지역은 지리적인 특성에 따라 밭 면적이 약 67,000 ha로 전체 농지의 65.69%를 차지한다(2018년 기준, KOSTAT). 따라서 재배작물 또한 고구마, 봄 무, 옥수수, 고추, 감자 등 밭작물의 재배가 활발하기 때문에 3월과 4월에 암모니아 배출이 집중되는 것으로 나타난다. 또한 고랭지 채소의 파종이 이루어지는 5월과 6월까지 암모니아 배출이 집중되는 것으로 나타났다.

경상남도는 창녕군 유어면, 창녕읍, 대합면 지역을 중심으로 가을 무 재배지역에 투입되는 비료에 의한 암모니아 배출량이 가장 많은 것으로 나타났다. 유어면 11.37 ton yr<sup>-1</sup>, 창녕읍 10.76 ton yr<sup>-1</sup>, 대합면 7.84 ton yr<sup>-1</sup>으로 산정되었고, 인근 대지면, 이방면 또한 가을 무 주 재배지로 암모니아 배출이 집중되는 것으로 나타났다.

경상북도의 밭 면적은 전국에서 가장 넓은 면적을 차지하며, 약 143,000 ha로 전체 농지의 19.1%를 차지한다(2018년 기준, KOSTAT). 그러나 경상북도 지역이 강원도와 달리 암모니아 배출이 특정 시기에 집중되지 않는 것은 재배 작물의 종류가 다양하고, 재배 시기에 제한이 덜하기 때문에 연중 고른 분포를 보이는 것으로 판단된다. 경상북도 지역에서 가장 높은 배출량을 보인 지역은 영천시 신녕면으로 9.32 ton yr<sup>-1</sup>이 배출되는 것으로 산정되었고, 암모니아 배출에 가장 크게 기여하는 작물은 마늘인 것으로 나타났다.

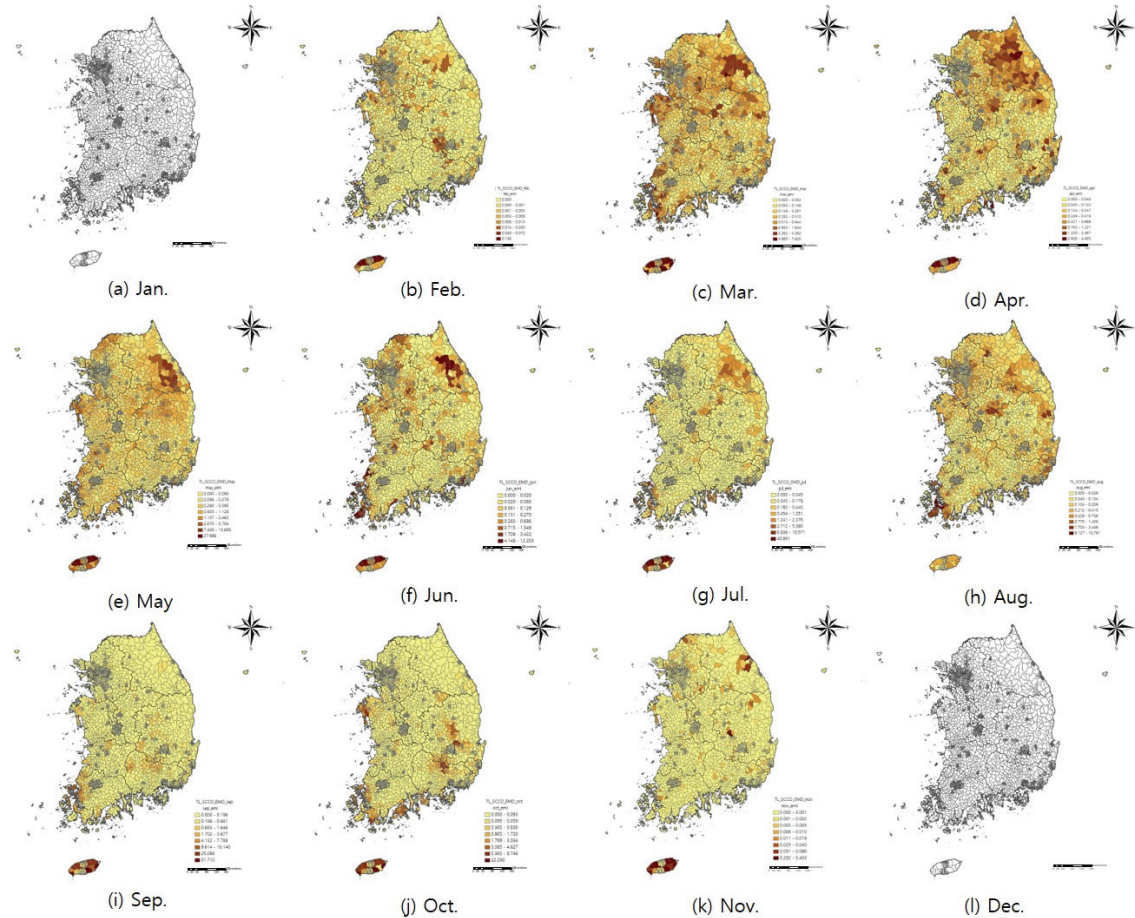


Figure 4. Spatial and temporal distribution of ammonia emission for fertilized cropland

전라남도도는 해안지역을 중심으로 밭 농업이 활발한 것으로 나타났다. 무안군 현경면, 해제면은 배추 주 생산지로 각각 32.06 ton yr<sup>-1</sup>, 30.07 ton yr<sup>-1</sup>로 산정되었고, 해남군 산이면, 문내면, 황산면은 시금치 재배가 활발한 지역으로 28.37 ton yr<sup>-1</sup>, 21.05 ton yr<sup>-1</sup>, 18.00 ton yr<sup>-1</sup>로 산정되었다. 또한 남부지역은 여름 파종 후 늦가을 수확이 가능한 지역으로 Fig. 4(h), (i)와 같이 8월, 9월 파종하여 비료 시비가 적극적으로 이루어져 제주와 더불어 하절기 암모니아 배출이 집중됨을 알 수 있다.

전라북도도는 고창군 대산면의 암모니아 배출량이 11.20 ton yr<sup>-1</sup>으로 가장 높게 나타났고, 양파, 가을 무 등 31개 작물이 고르게 분포하고 있다. 김제시 죽산면은 8.56 ton yr<sup>-1</sup>으로 나타났는데, 이 중 콩 생산에 의해 배출되는 암모니아가 8.37 ton yr<sup>-1</sup>로 97.78%를 차지해 죽산면이 콩 주산지로 사료된다.

충청남도도 또한 해안지역을 중심으로 암모니아 배출이 높은 것으로 나타났다. 충청남도 서산시 부석면이 15.69 ton yr<sup>-1</sup>로 충남 지역에서 가장 높게 산정되었고, 태안군 태안읍이 12.09 ton yr<sup>-1</sup>로 뒤를 이었다. 두 지역 모두 마늘과 생강 생산에 따른 암모니아 배출이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 충남 지역은 서산시 인지면, 팔봉면, 태안군 근흥면, 소원면 등에 마늘 경작지가 100 ha 이상 집중되어 마늘 생산에 따른 비료 투입에 기인한 암모니아 배출이 많다.

충청북도도는 괴산군 청천면 7.70 ton yr<sup>-1</sup>, 제천시 덕산면 6.88 ton yr<sup>-1</sup>로 산정되었다. 괴산군 청천면은 김장(가을)배추에 의한 암모니아 배출이 가장 많은 것으로 나타났고, 제천시 덕산면은 브로콜리 생산에 따른 암모니아 배출이 가장 큰 것으로 산정되었다. 단일 작목별 암모니아 배출량은 제천시 덕산면의 브로콜리가 경지면적 164.69 ha에서 5.33ton yr<sup>-1</sup>의 암모니아를 배출하는데 괴산군 불정면에서는 440.92 ha에서 콩을 경작할 때 2.16 ton yr<sup>-1</sup>의 암모니아를 배출할 것으로 산정되었다. 이와 같이 경지면적 대비 암모니아 배출량이 적은 작물이 있기 때문에 비료 사용에 따른 암모니아 배출의 적극적 관리를 위해서는 공간 배분을 더욱 세분할 필요가 있다.

제주특별자치도는 전국에서 가장 높은 암모니아 배출량 추정치를 보였다. 제주시 한림읍은 117.50 ton yr<sup>-1</sup>의 암모니아를 배출할 것으로 예측되었는데, 한림읍 지역이 암모니아 배출량이 높게 산정된 이유는 밭 농업지역이 집중되어 있고, 가을 무, 브로콜리, 양배추, 당근 등 질소 시비 요구량이 큰 작물이 집중되었기 때문으로 판단된다. 단일 작물로는 서귀포시 대정읍에서 가을 무 재배에 투입되는 비료 사용에 기인하여 48.98 ton yr<sup>-1</sup>의 암모니아 배출량이 산정되었다.

본 연구에서는 농경지 유래 암모니아 배출량 산정의 불확도를 개선하기 위해 상향식으로 수집되는 농가 재배 작물 종류와 표준재배법에서 제공하는 파종 시기를 고려하여 암모니아 배출량 산정 결과의 시공간 해상도를 향상하고자 하였다. 그 결과 암모니아 배출량은 월별로 파종하는 작물 종류와 지역별로 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 암모니아 배출 관리 방안 또한 관리 시기와 지역에 따라 차이를 두어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 대기정책지원시스템 농업 유래 암모니아 배출량과 비교·분석 결과

국립환경과학원 대기정책지원시스템 (CAPSS)에서 공개 및 제공하는 농업 유래 암모니아 배출량과 본 연구에서 산정한 배출량 추정 결과를 비교 및 분석하였다.

CAPSS에서 제공하는 농업 부문 암모니아 배출량은 축산활동과 비료 사용 농경지 유래 암모니아 배출량의 합으로 공개된다. 이 중 비료 사용 농경지 유래 암모니아 배출량은 2017년 기준 CAPSS 제공 농업 부문 암모니아 배출량 244,335 ton yr<sup>-1</sup>의 7%에 해당하는 17,103 ton yr<sup>-1</sup>으로 볼 수 있다.

본 연구에서 산정한 비료 사용 농경지 유래 암모니아 배출량은 2,912.52 ton yr<sup>-1</sup>로 산정되었다. 이는 CAPSS 제공량의 약 17%에 해당하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 암모니아 배출량이 CAPSS에 비해 적게 산정된 원인은 활동자료 수집 가능 여부에 따라 노지 밭작물 55종의 작물을 표본으로 선정하였고, 표준시비량을 적용하여 산정한 값이기 때문으로 판단된다. 여기에 논에서의 재배 작물과 55종 외의 밭작물 재배 면적 및 시설재배 면적에 퇴비사용에 대한 암모니아 배출량 산정이 보완될 때 현실적인 비료 사용 농경지 유래 암모니아 배출량이 산정될 수 있을 것으로 판단된다.

## IV. 결 론

본 연구는 비료 사용 농경지에서 발생하는 암모니아 발생량을 추정하고, 작물별 파종시기와 실제 재배 지역을 반영하여 농경지 유래 암모니아 배출량 산정방법의 시·공간 해상도를 향상 방안을 제시하고자 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 농업경영체 등록정보에 따르면 2020년 노지재배 밭작물 중 가장 많이 재배된 작물은 콩이며, 경지면적은 약 77,021 ha로 조사되었고, 고구마 22,057 ha,

마늘 20,048 ha, 감자 17,512 ha, 옥수수 16,636 ha 순으로 나타났다.

2. 연중 암모니아 배출량이 가장 많은 달은 5월로 590.01 ton yr<sup>-1</sup>이 배출되는 것으로 산정되었고, 3월 486.55 ton yr<sup>-1</sup>, 9월 404.59 ton yr<sup>-1</sup> 순으로 산정되었다.
3. 월별 파종 작물 종류와 시기적 특성을 반영하여 시·공간 배분을 수행하였다. 강원도 지역은 3월~6월 까지 강원도 전체 지역에서 고랭지 무, 고랭지 배추, 옥수수, 감자 등의 생산이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 전라남도는 해안지역을 중심으로 마늘, 고구마, 시금치 재배가 활발히 이루어지고 있으며, 이 작물이 파종되는 8월~10월에 높은 암모니아 배출량을 보이고 있다. 경상북도는 마늘 주산지인 경북 의성군, 창녕군의 암모니아 배출이 두드러지는데, 10월 마늘 파종 시기에 암모니아 배출이 집중되는 것을 확인 할 수 있었다. 제주도는 제한된 공간에 경작지가 집적되어 있는 형태로 제주도 한림읍이 117.50 ton yr<sup>-1</sup>으로 전국에서 가장 높은 암모니아 배출량을 보였다.

본 연구에서 산정한 암모니아 배출량은 일부 밭작물(55종의 노지 밭작물)의 표준 시비량을 활용하여 질소 시비량을 산정하고 읍면별 암모니아 배출량을 도출한 결과이다. 따라서 본 연구의 암모니아 배출량은 작물 생산 과정에서 배출되는 일부 값을 나타낸다는 한계를 갖고 있다. 향후 해당 지역의 실제 비료 투입량 자료를 구득한다면 보다 개선된 농경지 유래 암모니아 배출량 산정 방법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 현재 구득 가능한 자료를 기반으로 고해상도의 경지 면적 자료를 활용하여 농경지 유래 암모니아 배출량의 합리적 공간 배분 방법을 제시한 것에 의의가 있다.

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ014206032021)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Choi, H., J. Hyun, Y. J. Kim, and G. Yoo, 2019, Improvement of Ammonia Emission Inventory Estimation Methodology for Fertilizer Application in the Agricultural Sector, *Journal of Climate Change Research*, 10(3): 237-242.
2. RDA, <https://www.nongsaro.go.kr/portal/ps>, accessed Oct. 28, 2021.
3. Kim, M. S., M. Park, H. G. Min, E. Chae, S. Hyun, J. G. Kim, and N. Koo, 2021, A case study on monitoring the ambient ammonia concentration in paddy soil using a passive ammonia diffusive sampler, *Korean Journal of Environmental Biology*, 39(1): 100-107.
4. Lee, Y. B., H.-B. Lee, H. B. Yun, and Y. Lee, 2008, Alum as a Chemical Amendment for Reducing Ammonia Emission and Stabilizing Pig Manure Phosphorus during Composting, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 27(4): 368-372.
5. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2017, Agriculture, Food and Rural Affairs Statistics Yearbook.
6. Ministry of Environment(ME), Suwon University and Industry Collaboration Foundation, Inha University and Industry Collaboration Foundation, Gyeonggi Research Institute, Anyang University and Industry Collaboration Foundation, Korea Environmental Institute. 2014. Improvement of Air Pollution Emission Inventory and Its Reliability. Sejong: Ministry of Environment.
7. Nam, J., 2019, Another challenge in agriculture: The problem of particulate matters, GS&J Institute.
8. National Academy of Agricultural Science (NAAS). 2017, Criteria for the fertilizer use by crop.
9. National Institute of Environmental Research (NIER), 2013, National Air Pollutant Emission Calculation Method Manual (III).
10. Oh, Y. G., J. Park, and S. Hong, 2020, A study on the establishment of an agricultural ammonia emission inventory and regional unit emission coefficient calculation model for the response to particulate matters in the agricultural sector, *Rural Resources*, 62(2): 24-31.
11. Song S., 2021, A Study on the Chemical Composition and Emission Calculation of Agricultural Particulate Matter : Focusing on Ammonia from Compost Application in Protected Cultivation, Masters thesis, Jeonbuk National University.
12. Yun H. B., Y. Lee, S. M. Lee, S. C. Kim, and Y. B.



Lee, 2009, Evaluation of Ammonia Emission Following Application Techniques of Pig Manure Compost in Upland Soil, Korean Journal of Environmental Agriculture, 28(1): 15-19.

- 
- Received 25 September 2021
  - Finally Revised 24 October 2021
  - Accepted 22 November 2021