



농업부문 비료사용 농경지의 암모니아 배출량 산정방법 개선

최한민* · 현준기* · 김유진** · 유가영****

*경희대학교 대학원 환경응용과학과 석사과정학생, **경희대학교 대학원 환경응용과학과 박사과정학생,
***경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과 교수

Improvement of Ammonia Emission Inventory Estimation Methodology for Fertilizer Application in the Agricultural Sector

Choi, Hanmin*, Hyun, Junge*, Kim, You Jin** and Yoo, Gayoung****

*Master Student, Dept. of Applied Environmental Science, Kyung Hee Univ., Suwon, Korea

**Ph. D. Student, Dept. of Applied Environmental Science, Kyung Hee Univ., Suwon, Korea

***Professor, Dept. of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee Univ., Suwon, Korea

ABSTRACT

Ammonia is main precursor gas of secondary particulate matter and contributes almost 78% of total ammonia emission from the agricultural sector in Korea. The current method of estimating ammonia emission from fertilizer application, which contributes 7% of the total emission, has high uncertainty and needs to be improved to better predict PM2.5 concentration. In this study, we suggest an improvement method for ammonia emission quantification from fertilizer application. The first improvement was in the emission factor of NPK fertilizer by conducting a field study to verify the currently used factor. The improved NPK emission factor of 52.2 kg NH₃-1N was confirmed by comparing with the value from the EEA (European Environment Agency) and adjusting the value for the Korean climate and soil conditions. We also improved the amount of fertilizer usage by including the sales amount to the fertilizer supply amount of the Korean Farmers Association, increasing total fertilizer usage by 39.8%. As the statistical data on fertilizer supply and sales are compiled yearly, we estimated monthly emission of ammonia by considering cultivated areas and timing of fertilization for each crop.

In summary, we suggest a novel and practical method to improve estimation methodology of ammonia emission from the field of fertilizer application: 1) emission factor of NPK fertilizer was reconfirmed; 2) total amount of fertilizer use was revised considering fertilizer sales; and 3) monthly emission of ammonia was realized by considering different crop practices. A bottom-up approach to compile activity data is needed to increase the estimation accuracy of monthly emission of ammonia, which is very helpful for predicting PM2.5 concentration.

Key words: Ammonia, Emission Factor, Fertilizer Application, PM2.5

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 이상기후가 나타나고 있으며, 특히 기온 상승, 대기 정체, 강수량 감소 등과 같은 현상들로 인해 미세먼지가 2차 생성되기 좋은 환경이 만들어지고 있다 (Jacob and Winner, 2019). 2차 생성 미세먼지는 SO_x, NO_x 및 NH₃ 등 전구물질이 대기 중에서 화학 반응하여 황산암모

늄이나 질산암모늄 등의 형태로 생성된 2.5 μm 이하의 입자를 뜻하며 (Pandis, 1992), 국내 초미세먼지의 72% 이상이 2차 생성 미세먼지로 이루어져 있다고 보고된다. Behera et al. (2013)에 의하면, 이러한 전구물질 중에서 특히 NH₃의 전 세계 배출량이 지속적으로 증가하고 있다고 한다. 국내 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, 이하 CAPSS) 자료에서도 2001년 대비 2014년 연간 배출량이 SO_x

*Corresponding author: gayoo@khu.ac.kr (1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea. Tel. [redacted])

와 NO_x는 모두 감소했으나 NH₃는 증가하는 추세를 보이고 있다. NH₃는 2015년 기준 297,167 ton이 배출되었으며 이 중 농업부문에서 배출된 양이 231,263 ton으로 총량의 78%를 차지한다. 농업부문의 암모니아 배출은 비료사용 농경지와 분뇨관리로 나뉘는데, CAPSS에 따르면 이 중 비료사용 농경지에서 배출되는 암모니아가 총 배출량의 7%로 산정되고 있으나, 이에 대한 불확실성이 높고 (Jang, 2014) 배출계수 산출을 위해 2006년 ~ 2007년에 진행된 실험 외에는 국내 연구가 미미한 실정으로 반드시 개선이 필요한 분야로 보고된다.

본 연구는 현재 시행 중인 CAPSS에서 산정되는 비료사용 농경지의 암모니아 배출량 산정방법에 대해 검토하여 문제점을 파악하고 이의 개선방안을 제안하고자 수행되었다. 이를 위하여 아래 세 가지 하위 목적을 수립하였다; 1) 암모니아 배출량 산정 시 적용되는 배출계수의 대표성을 검토하고 야외실험을 통해 개선한다; 2) 현행 활동도 자료의 한계점을 파악하여 개선한다; 3) 현행 암모니아 배출의 시간배분 방식을 개선한다.

2. 현행 CAPSS의 비료사용 농경지 암모니아 배출량 산정방법 검토 및 문제점

현행 CAPSS의 농업부문 중 비료사용 농경지의 암모니아 배출량 산정방법은 Tier 1과 Tier 2의 중간수준으로 <식 1>과 같다. 비료사용 농경지의 암모니아 배출은 투입한 비료의 질소함량과 관련이 있기 때문에 배출계수에 연간 비료 사용량과 제품별 질소함량을 곱하여 산정한다.

$$E = A \times N / 100 \times EF \quad (\text{식 } 1)$$

E는 연간 암모니아 총 배출량 (kg yr⁻¹), A는 비료 사용량 (ton fertilizer yr⁻¹), N은 사용된 비료의 질소함량 (%), 100은 질소함량의 단위 환산계수이며 EF는 암모니아 배출계수 (kg NH₃ ton⁻¹ N)이다.

2.1 배출계수

현행 CAPSS에서 사용하고 있는 배출계수 중 요소와 복합비료는 국가고유 배출계수이며 (NIER, 2008), 황산암모늄과 기타 세분류 (무수암모니아, 암모니아수, 질소용액, 질산암모늄, 티오황산암모늄, 기타질소, 인산암모늄)는 US EPA (1994)의 값을 사용하고 있다. 국가고유 배출계수는 2006년 ~ 2007년 2년간 수행한 실험을 바탕으로 산정하였다. 국내에

서 수행된 실험은 논과 밭에서 각각 진행되었으나 CAPSS의 비료사용 농경지 분류체계는 논과 밭을 구분하지 않기 때문에, 논과 밭의 국내 총 면적을 기준으로 가중치를 적용하여 배출계수를 산정하였다.

현재 사용되는 국가고유 배출계수의 신뢰도 확인을 위하여 국내계수와 국내 기후 및 토양 환경과 유사한 조건의 EMEP/EEA Tier 2 배출계수 (Cool, normal pH)를 비교해 보면, 요소의 국내 배출계수는 EEA 계수에 비해 불과 8.7% 낮은 수준으로 큰 차이가 없지만, 복합비료의 국내 계수는 EEA 계수 대비 50%나 높아 신뢰도의 문제가 제기되었다. 한편, 복합비료의 배출계수는 요소 배출계수를 위한 실험에 비해 실험횟수가 부족하여 이에 대한 확인이 필요하다고 판단되었다.

2.2 활동도 자료

현행 CAPSS의 농업부문 비료사용 농경지 암모니아 배출량 산정에 필요한 활동도 자료 중 비료사용량은 실제 농경지에 시비된 정확한 비료량을 파악하기 어렵기 때문에 농업협동조합중앙회 (이하 농협)에서 공급된 비료량을 간접적으로 활용한다. 농협에서 공급한 연간 비료량이 전량 농경지에 투입된다는 가정 하에 이를 연간 총 비료사용량으로 간주한다.

활동도 자료를 연단위로 수집하여 월간 사용량을 산정할 수 있는 방법이 없기 때문에 4월에서 10월까지 총 암모니아 배출량을 균등하게 배분하여 월별 배출량 산정에 이용한다. 공간배분은 환경부 토지피복도 자료의 농경지 면적분포에 따라 읍·면·동 단위로 총 비료사용량을 나누어 적용하며 비료 종류별 질소함량은 각 비료회사별로 취합된 질소함량 자료를 사용한다. 현행 활동도 자료에 대한 문제점을 지적하면 아래와 같다.

첫째, 농업 현장에서 농민들은 농협으로부터 공급받은 비료 이외에도 시중에서 구매하는 비료 또한 사용하고 있다는 점이다. MAFRA (2017)에 따르면 시판되는 복합비료가 2015년 기준 339,870 ton으로 농협에서 공급되는 복합비료량인 583,350 ton의 55%에 달하는데, 이는 암모니아 총 배출량 불확실성의 주요한 원인이 되고 있다.

둘째, 월별 암모니아 배출량을 산정하는 부분에 있어서도 많은 문제가 있다. 월별 암모니아 배출량을 연간 총 암모니아 배출량을 기준으로 4월 ~ 10월에 균등하게 배분한다는 것은 실제 농경활동의 과정을 전혀 반영하지 못할 뿐만 아니라, 비료 시비 후 한 달 이내에 암모니아 휘발이 거의 대부분 일어난다는 배출특성 (Sheppard et al., 2009)도 전혀 고려하고 있

지 않다. 한편, 국내 전체 작물재배 면적의 4.2%를 차지하는 시설작물의 경우는 4월 ~ 10월에 한정되지 않고 사계절에 걸쳐 농업활동을 진행하는데, 이에 대한 고려도 되지 않고 있다는 문제점이 있다.

3. 암모니아 배출량 산정방법 개선

3.1 배출계수 개선

현행 배출계수 중 앞서 문제점이 제기된 복합비료 배출계수의 정확도 검증 및 대표성 확보를 위해 현장 실험을 수행하였다. 실험은 경기도 수원시에 위치한 경기도 농업기술원 내 밭에서 수행되었으며 시험지 토양의 기초 성상은 Table 1과 같다. 2019년 5월 8일 경운을 하고 두둑을 설치하였으며 동월 29일에 처리구를 조성하였다. 처리구의 종류는 처리를 하지 않은 대조구 (CON)와 복합비료를 투입한 처리구 (NPK)로 구성되었다. 비료는 질소 성분이 21%인 복합비료를 사용하였으며, 표준재배법에 따라 질소 기준 100 kg N ha⁻¹ 만큼 투입하였다. 이 후 두 처리구에 상추를 정식하고 관개 시설과 풍동을 설치하였으며 6월 29일까지 총 32일간 암모니아 배출량을 측정하였다. 이는 NPK 처리구의 암모니아 배출량이 대조구의 배출량과 동일해지는 시점에서 약 1주 후까지의 기간에 해당한다.

3.1.1 암모니아 측정 및 배출량 산정

풍동 내부의 풍속은 임펠러 펌프의 흡입구 기준 2.0 m s⁻¹로 유지하였으며 풍동 입구의 레퍼런스 포트와 끝 부분의 샘플링 포트에서 3 L min⁻¹만큼의 공기를 흡입하여 각각의 포집병을 통과시켰다. 포집병은 매일 교체하였으며 실험실로 가져와 용액의 부피를 측정하고 pH를 6.5~7 사이로 맞춘 후 Salicylate microplate method로 암모늄 농도를 측정하였다 (Sims et al., 1995). 측정된 암모늄 농도와 풍동 및 각 포트의 유량을 고려하여 풍동 내부 토양에서의 암모니아 배출속도

(flux)를 산정하였다 (g N ha⁻¹ hr⁻¹) (Woodley et al., 2017). 실험기간 동안 대조구와 NPK 처리구의 누적 암모니아 배출량은 배출속도에 샘플링 시간을 곱하여 산정했으며, 두 처리구의 누적 암모니아 배출량 차이를 복합비료 투입에 의한 암모니아 배출량으로 하였다. 산정된 암모니아 배출량을 투입한 비료의 질소량으로 나누어 배출계수를 산정하였다 (kg NH₃ ton⁻¹ N).

본 실험은 시비가 가장 많이 이루어지는 3월 ~ 5월에 비해 상대적으로 기온이 높은 6월에 수행되었기 때문에, 온도 영향을 보정해 주기 위하여 토양에서의 암모니아 배출에 대한 Q₁₀ 값을 이용하였다. 비료 투입으로 인한 암모니아 배출의 Q₁₀ 값은 지역 별로 차이를 보이는데 (Baer et al., 2014) 국내에서 이에 대한 연구가 진행된 사례가 없기 때문에 Sheppard et al. (2009)를 참고하여 1.5를 사용했다.

3.1.2 암모니아 배출량 산정 결과

복합비료 투입에 의한 누적 암모니아 배출량을 Fig. 1에 나타내었다. 암모니아 배출은 비료 투입 후 10일 동안 가장 활발하게 일어났으며, 이 기간 동안 배출량의 65%가 배출되었다. 이후 점차 배출량이 감소하여 25일 차 이후에는 대조구와 동일한 배출량을 보였다. 본 실험에서 측정된 복합비료의 암모니아 배출계수는 74.3 kg NH₃ ton⁻¹ N으로, 현행 CAPSS의 복합비료 배출계수인 75.2 kg NH₃ ton⁻¹ N와 유사한 수준이었으나 위에 설명한 바와 같은 이유로 온도보정을 시행하였다. 시험지가 위치한 수원시의 30년 (1981년 ~ 2010년) 평균 기온은 12.0°C이며 (KMA, 2011), 본 실험 기간 동안의 평균 기온은 21.1°C이었다. 본 연구에서 산정된 복합비료의 암모니아 배출계수인 75.2 kg NH₃ ton⁻¹ N에 온도 보정식인 (1.041^{21.1})/(1.041¹²)을 적용한 결과 배출계수는 52.2 kg NH₃ ton⁻¹ N로 계산되었으며, 이는 EMEP/EEA의 배출계수 50.0 kg NH₃ ton⁻¹ N와 유사한 수준으로 해당 계수의 적합성을 검증하였다.

Table 1. Physicochemical properties of soil

Sand	Silt	Clay	Texture	Bulk density	pH
-----%-----				---g cm ⁻³ ---	1:5 (w/v)
61.3	25.6	13.1	Sandy loam	1.5	6.86
TC	TN	TH	C/N ratio	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
-----%-----				---mg kg ⁻¹ ---	
1.4	0.1	0.8	25.8	5.1	33.7

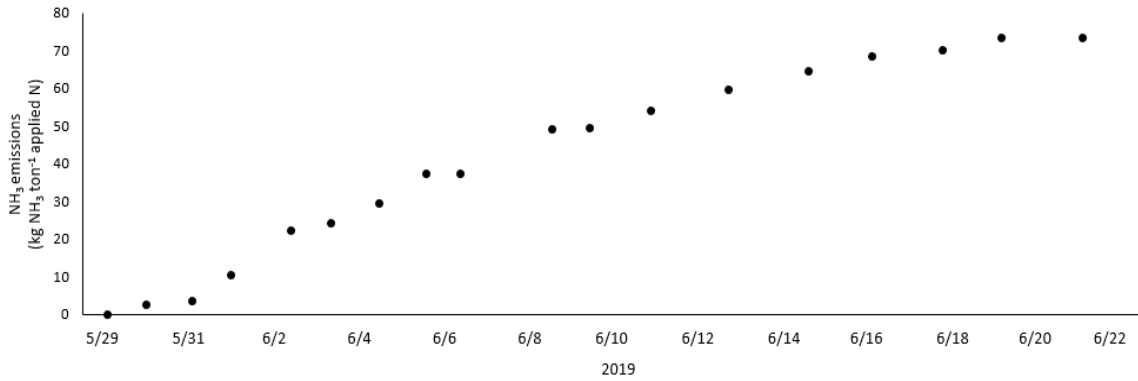


Fig. 1. Cumulative ammonia emissions according to the application of NPK.

Table 2. Agricultural Cooperative fertilizer supply and sales (2015)

	Urea	Ammonium sulfate	NPK fertilizer
	----- ton fertilizer -----		
Supply	170,761	9,293	583,350
Sales	-	-	339,870
Total	170,761	9,293	923,220

3.2 활동도 자료 개선

3.2.1 비료 사용량 현실화

개선된 비료 사용량 결과를 Table 2에 나타냈다. 요소와 황산암모늄은 기존 CAPSS의 수치를 그대로 사용한 반면, 복합비료는 농협 공급량에 시판량 339,870 ton을 추가하여 기존 CAPSS 수치 대비 55%만큼 증가하였다. 이는 현행 CAPSS에서 산정한 비료사용 농경지에서의 암모니아 배출량이 과소평가되었을 수 있다는 점을 시사한다.

3.2.2 시간배분 현실화

현재 우리나라에서는 실제 비료 사용 현황에 대한 자료가 수집되고 있지 않기 때문에 실제로 재배 중인 작물의 표준재배법을 통해 보다 현실적인 시간배분을 하였다. 본 연구에서는 각 시·군·구의 작물별 재배면적 (KOSIS, 2015)과 해당 작물의 표준재배법 (NAAS, 2017)에 근거한 월별 시비 시기 자료를 구축하여 시간 배분을 수행하였으며 구체적인 방법은 다음과 같다. 우선 농림어업총조사의 66가지 작물 항목의 통계자료 (작물명·재배 면적 및 시설 유무를 고려한 유형별 분류)를 수집하였다. 이 중 재배 작물이 명시되지 않아서 시비량 산정이 어려운 16개 항목을 제외한 나머지 50개 항목의

재배 면적과 해당 작물에 대한 시비 시기 (월) 및 표준 시비량을 농촌진흥청 표준재배법에 따라 정리하였다. 각 작물의 재배 면적 (ha)에 표준 시비량 (kg N ha⁻¹)을 곱하여 작물별 질소 시비량을 산정하였다 (kg N). 50개 작물에 대한 질소 시비량을 산정한 후 각 작물의 시비시기에 맞게 해당 월에 분배하였다. 단, 시설작물의 경우 시비 일정을 판단하는데 어려움이 있어 1월부터 12월까지 동일하게 시비된다고 가정하였다. 이를 기반으로 월별 국가 총 질소 시비량을 산정하였다.

표준재배법을 통해 산정한 2015년 연간 총 질소 시비량은 143,966 ton으로 앞 절에서 파악한 공급·시판되는 질소량 총합인 261,458 ton의 55% 수준이었다. 이 차이는 농림어업총조사에서 작물명을 명시하지 않아서 시비량을 고려하지 못한 16개 항목에 의한 것으로 판단된다. 또한 표준시비량과 실제 농가에서 시비하는 양 간의 차이도 원인인 것으로 사료되는데, Kim (2018)에 따르면 전국의 일부 농가를 대상으로 비료 사용량을 조사했을 때 실제 시비량이 표준시비량보다 최대 90%까지 초과하여 시비한 작물도 있었으며, 평균적으로 농가에서 31.7% 초과 시비가 이루어졌다고 한다. 즉, 실제 농가에서 표준 시비량보다 많은 비료가 투입된다는 것이다. 공급 받은 비료 외에 시중에서 추가적으로 비료를 구매하였으므로 해당 비료는 모두 사용된다고 가정하고 이들 간의 차이를 보

Table 3. Monthly N amount from fertilizer application

month	Applied N ---- ton N ----	month	Applied N ---- ton N ----
1	2,756	7	3,317
2	14,266	8	32,512
3	28,138	9	2,476
4	143,518	10	10,338
5	13,017	11	8,767
6	1,444	12	903
		Total	261,458

정하기 위하여 표준시비량에 기반하여 산정된 월별 시비량에 1.8을 곱하여 총량을 공급·시판량과 동일하게 맞추었으며 이를 Table 3에 나타내었다. 이 결과, 국내 비료 사용량은 봄 및 가을 파종 시기인 3월 ~ 5월과 8월 ~ 9월 사이에 집중된 것을 볼 수 있었다.

3.3 시간배분 개선안에 따른 암모니아 배출량

월별 시비량에 질소함량과 배출계수를 곱하여 암모니아 배출량을 산정하였다 (Fig. 2). 단, 각 작물에 투입되는 비료의 종류까지는 알 수 없기 때문에 모든 농경지에 요소, 복합비료, 황산암모늄이 공급·시판된 질소 총합의 비율과 동일하게 투입되었다고 가정하였다. 개선된 방법을 이용하여 산정한 국내 연간 총 암모니아 배출량은 20,351 ton으로 기존 CAPSS에서 산정한 19,902 ton에서 불과 2.26%만이 증가되었다. 이는 비료 사용량이 복합비료 기존 비료 사용량 대비 55% 증가하였지만, 복합비료 배출계수가 75.2 kg NH₃ ton⁻¹ N에서 52.2 kg NH₃ ton⁻¹ N로 31%만큼 감소하여 총량에는 큰 변화가 없는 것이다. 하지만 본 연구에서 기여한 부분은 암모니아 배출량이 월별 배출량 변화를 반영했다는 점인데, 이는 연간 총 배출량을 정확하게 산정하는 것이 가장 중요한 온실가스와는 달리, 암모니아의 경우 월별 또는 시간별 배출량에 대해 파악하여 PM2.5 형성에 기여한 바를 파악하는 것이 더 중요하기 때문에 더 큰 의의가 있다. 본 연구에서 개선된 월별 암모니아 배출량 변화를 보면 현행 CAPSS의 경우 4월 ~ 10월의 배출량이 2,843 ton으로 동일하며 그 외는 배출량이 없다고 산정한 것과 대조적으로 봄 파종 및 가을 파종 시기에 암모니아 배출량이 두드러지게 나타난 것을 볼 수 있었다. 특히 4월의 암모니아 배출량이 11,390 ton 으로 CAPSS 대비 400% 이상 증가하였다.

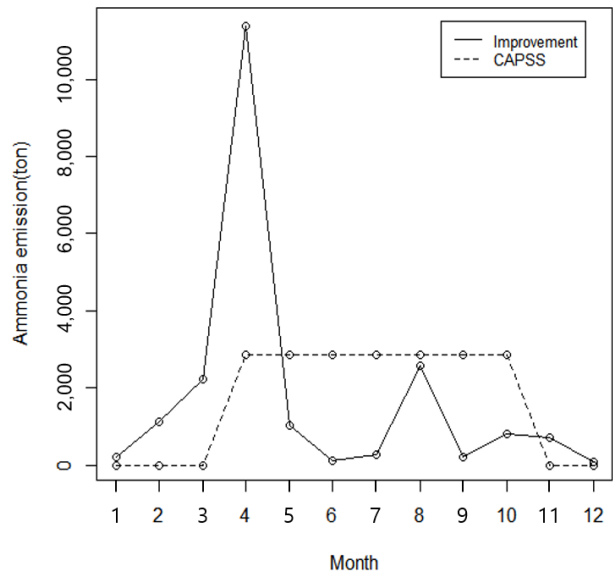


Fig. 2. Ammonia emissions from fertilizer application.

4. 결론

본 연구는 초미세먼지의 대부분을 차지하는 2차 생성 미세먼지의 전구물질인 암모니아 배출량 산정에 사용되는 배출계수와 활동도 자료의 개선을 통해 현행 CAPSS 농업부문 비료 사용 농경지 암모니아 배출량 산정방법의 개선방안을 제안하고자 하였다. 본 연구는 현행 CAPSS에서 사용되는 복합비료 배출계수의 정확성 검증을 위하여 전 세계적으로 널리 활용되는 풍동 방법을 활용한 야외실험을 수행함으로써 국가고유 배출계수로서의 신뢰성을 검증하였다. 한편, 농협에서 시군구별로 공급하는 비료량만을 산정하던 기존 CAPSS 방식에 복합비료에 대한 시판량 (MAFRA, 2017)을 합하여 비료 사용량을 현실화 하였다. 또한 4월 ~ 10월 사이 동일하게 배출된다고 가정하였던 암모니아 배출량을 실제 작물의 시비시기를 고려하여 시간 프로파일의 해상도를 높였다.

공급량과 시판량을 모두 고려한 실제 비료사용량과 표준재배법을 통해 산정한 비료사용 처방량을 비교했을 때 이들간의 차이가 상당히 컸다. 이는 실제로 농가에서는 과도한 시비가 이루어지고 있으며 암모니아 배출량 산정 시 이로 인한 오차가 있다는 것을 의미한다. 즉, 하향식 (Top down)으로 진행되던 활동도 자료 수집이 실제 농가를 대상으로 진행하는 상향식 (Bottom up)으로 개선되어야 할 필요가 있다. 경상남도 농업기술원이 2017년도부터 경남지역 농가의 비료사용 실태를 조사하고 있으며, 이를 참고하여 각 지역별로 활동도 자료를 지속적으로 수집할 수 있을 것으로 사료된다. 이처럼

상향식으로 활동도 자료를 수집하게 될 경우, 시간배분의 측면에서도 현실적인 시비시기에 관한 자료를 얻을 수 있기 때문에 본 논문에서 일괄 배분하였던 시설작물에 대한 시비도 고려할 수 있을 것으로 보인다. 또한 암모니아는 특성상 기온 및 강수량에 영향을 받고, 농경지의 종류 (초지·밭·논) 및 비료 투입 방법 등에 따라서도 배출량이 달라지므로 이에 대한 보정계수 개발이 필요하다. 현재 이용 가능한 자료로는 농경지의 종류 (토지피복도, 국토환경정보센터), 토양 pH (토양환경지도, 농촌진흥청), 기상정보 등이 있으며, 이에 대한 보정계수가 우선적으로 개발되어야 할 것으로 판단된다. 실측실험을 통한 국가 고유 배출계수 및 보정계수 개발에는 최소 3개 지역 (기후대별), 토성, pH와 이용 목적 (논·밭·초지·과수원 등)이 다른 지점을 고려할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (세부과제번호: PJ011855062018)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Daniel JJ, Darrell AW. 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment* 43: 51-63.
- European Environment Agency. 2016. EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook.
- Sims GK, Ellsworth TR, Mulvaney RL. 2008. Microscale determination of inorganic nitrogen in water and soil extracts. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 26: 303-316.
- Kim SC, Kim MS, Lee CH, Park SJ. 2018. Comparison of Farm Based Fertilizer Usage and Fertilizer Recommendation Amount for Major Upland Crops. Korean Society of Soil Science and Fertilizer, scholarship symposium 2018; 2018 Oct 24-Oct 27; The K Hotel, Gyeongbuk, Korea; Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer. p. 149-150.
- Jang YK, Jung YW, Kim DY, Koo YS, Ministry of Environment, 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.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2017. Agriculture, Food and Rural Affairs Statistics Yearbook.
- National Academy of Agricultural Science (NAAS). 2017. Criteria for the fertilizer use by crop.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2013. National Air Pollutant Emission Calculation Method Manual (III).
- National Institute of Environmental Research. 2008. Atmospheric ammonia emission measurement and inventory (II).
- Sailesh NB, Mukesh S, Viney PA, Rajasekhar B. 2013. Ammonia in the atmosphere: A review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research* 11: 8092-8131.
- Sheppard SC, Bittman S, Swift L, Tait J. 2009. Monthly ammonia emissions from fertilizers in 12 Canadian Ecoregions. *Canadian Journal of Soil Science* 90: 113-127.
- Spyros NP, Robert AH, Glen RC, John HS. 1992. Secondary organic aerosol formation and transport. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* 26: 2269-2282.
- Statistics Korea (KOSIS). 2015. Agricultural and Fishery Survey.
- Steven EB, Tara LC, Rachel ES, Patricia LY, Deborah AB. Effect of temperature on rates of ammonium uptake and nitrification in the western coastal Arctic during winter, spring, and summer. *Global Biogeochemical Cycles* 28: 1455-1466.