

## 국내외 가축분뇨 퇴액비 이용 분야 암모니아 배출량 인벤토리 비교 연구

김민석, 구남인<sup>1</sup>, 김정규<sup>2,\*</sup>

고려대학교 오정에코리질리언스연구원, <sup>1</sup>국립산림과학원 산림육성복원연구과, <sup>2</sup>고려대학교 환경생태공학부

## A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study

Min-Suk Kim, Namin Koo<sup>1</sup> and Jeong-Gyu Kim<sup>2,\*</sup>

O-Jeong Eco-Resilience Institute, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>1</sup>National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Republic of Korea

<sup>2</sup>Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

### \*Corresponding author

Jeong-Gyu Kim  
Tel. 02-3290-3474  
E-mail. lemonkim@korea.ac.kr

Received: 30 December 2019

First Revised: 28 January 2020

Second Revised: 14 February 2020

Third Revised: 14 February 2020

Revision accepted: 17 February 2020

**Abstract:** In Korea, more than 70% of the ammonia (NH<sub>3</sub>) released into the atmosphere is known to originate from livestock manure. The total emission (kg year<sup>-1</sup>) is calculated by multiplying the emission factor (kg head<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) and the activity data (head). To improve the accuracy and reliability of the NH<sub>3</sub> emission estimation process, an accurate account of livestock manure production, calculation of NH<sub>3</sub> conversion and generation during the composting and liquefaction of manure, estimation of NH<sub>3</sub> generation in the storage and transportation of manure and compost, and a comparative study of NH<sub>3</sub> emission during the soil spreading process must be performed. Compared to the US and EU-28, in particular, the domestic emission factor is relatively even and the spatial/temporal scale is not broken down sufficiently to reflect the domestic situation. As a way to improve the accuracy and expertise of estimating NH<sub>3</sub> emission factors, a 'dynamic chamber-capture system' can be utilized, which allows complex considerations of compost, liquid manure, soil, and climate characteristics. By reviewing and comparing the data related to domestic and foreign NH<sub>3</sub> emission, we identified shortcomings in the current domestic system and the directions to be taken and suggested a chamber system that could estimate NH<sub>3</sub> emission flux. It is also necessary to establish a methodology for mesocosm systems in the field, in addition to indoor chamber systems, to be linked with practical policies, such as the calculation of new emission factors for missing sources.

**Keywords:** ammonia, emission factor, liquid fertilizer, national inventory

## 서 론

우리나라는 1980년대 이후 국민의 소득증대와 정부의

축산진흥정책에 힘입어 축산 농가 및 가축 사육두수가 지속해서 증가하였고, 그에 따른 사육 규모의 기업화, 대규모화로 가축분뇨에 의한 환경문제도 대두되었다(Yoon *et al.*

2008). 이러한 가축분뇨로 인한 토양 및 지하수 오염 그리고 악취에 의한 민원 증가와 같은 환경문제는 가축에 급여하는 사료에서 출발한다 볼 수 있다. 2017년 기준, 2,775만 톤의 사료가 수급되었으며, 배합사료와 조사료의 수급량은 각각 1,920만 톤과 576만 톤으로 전체 수급의 69%와 21%를 차지했다. 이중 배합사료의 국내 자급률을 29% (1,335만 톤)로(MAFRA 2018), 환경오염의 원료 물질을 주로 수입에 의존하고 있는 실정이다.

농림축산식품부에 따르면 연간 가축분뇨의 발생량은 2012년부터 큰 변화 없이 발생되고 있으며, 2017년에는 약 4,846만 톤의 가축분뇨가 발생하였다. 이렇게 발생한 가축분뇨의 90% 이상은 퇴비화 및 액비화 등 자원화되고 있으며 9%는 정화과정을 거쳐 방류되고 있는 것으로 집계되었다. 그러나 퇴액은 그 생성에서 농경지 사용까지 전과정에 걸쳐 환경에 부담을 안기고 있다. 퇴비화 및 액비화 과정, 그리고 농경지 살포 과정에서 다량 발생하는 암모니아( $\text{NH}_3$ )는 악취의 원인 물질이자 동시에 초미세먼지( $\text{PM}_{2.5}$ )의 전구체(precursor)로 작용하며(Hristov 2011), 퇴액비의 과도한 농경지 살포는 토양, 지하수 그리고 인근 수계를 오염시킬 수 있다. 특히 우리나라의 경우 농사를 시작하기 이전인 봄철에 퇴액을 많이 살포하는데, 이때 초미세먼지 전구체인 암모니아가 다량 발생하며, 이는 봄철 황사 및 미세먼지와 맞물려 국내 미세먼지 상황을 더 악화시키는 것으로 인식되고 있다(Behera *et al.* 2013; Shin *et al.* 2017). 또한 짧은 시간 내에 많은 양의 분뇨를 처리할 경우, 부숙 시간이 부족하여 퇴액비의 품질이 저하되기 쉬우며, 부숙도가 떨어지는 비료는 악취 및 병원균의 문제를 야기할 수 있다(Kang *et al.* 2017). 이에 2020년부터는 가축분뇨법에 의거, 퇴비와 액비의 부숙도 관리를 실시하여 살포 시 품질 기준에 부합하지 않을 경우 행정처분을 받게 되며, 가축분뇨를 포함하는 양분관리를 위하여 양분부하 및 양분수지 분석을 통한 지역단위 양분관리제도의 도입을 추진 중에 있다(Lee and Yoon 2019).

가축분뇨 및 퇴액비 악취의 주요 원인물질인 암모니아는 지구상에 존재하는 몇 안 되는 염기(base) 가스로서, 황산화물( $\text{SO}_x$ ), 질소산화물( $\text{NO}_x$ )과 같은 산(acid) 가스들과 쉽게 반응하여 초미세먼지의 입자상 무기 암모늄염을 형성한다(Hodan and Barnard 2004). 미세먼지( $\text{PM}_{10}$ )의 경우 정부의 대기 환경개선 대책들로 인하여 지속적으로 감소하여 2000년대 초반보다 절반 수준으로 감소하였지만,

초미세먼지의 경우 OECD 회원국 중에서 가장 나쁜 수준이며 고농도사례도 빈번히 발생하여 국민이 체감하는 대기 개선 효과는 미흡한 실정이다(Shin *et al.* 2017). 이러한 문제의 주요 원인 중 하나가 바로 2차 생성 미세먼지의 증가이며, 황산화물, 질소산화물, 암모니아를 그 주요 원인 물질로 보고 있으나 상대적으로 암모니아의 배출 관리는 미흡하고 관련 정보 또한 부족한 실정이다. 또한, 여러 정부 부처들이 사용하는 관련 통계자료에 일관성이 부족한 점을 미루어볼 때, 발생원을 기준으로 암모니아의 발생과 거동에 대한 이해와 정리가 시급한 상황이다.

따라서 본 연구의 목적은, 국내 가축분뇨 퇴액비 이용과정에서 발생하는 암모니아 인벤토리의 합리적인 구축을 위하여 국내의 인벤토리 자료를 비교 연구하고, 농경지 살포 시 암모니아 배출 과정 및 평가방법을 개선하는 데에 있다.

## 본 론

### 1. 국내·외 암모니아 인벤토리

국립환경과학원의 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System; CAPSS)에서 제공하는 8가지 대기오염 물질 가운데 암모니아를 대상으로 그 배출량과 배출량산정을 위한 배출계수, 활동도 자료를 수집하였다. CAPSS에서는 대기오염물질의 배출원을 13개 대분류로 구분하고 있으며, 이 가운데 암모니아는 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 도로이동오염원, 비도로 이동오염원, 폐기물처리, 농업, 기타 면오염원, 그리고 생물성 연소 등 10개 부문에서만 배출되는 것으로 가정하고 있다. 농업부문은 다시 비료사용농경지와 분뇨관리의 두 개의 소분류로 나뉘는데, 본 연구에서는 분뇨관리 부문만을 연구범위로 한정하고, 2015년을 기준으로 하였다. 국내 암모니아 인벤토리와 비교를 위한 국외 현황을 확인하기 위하여 미국과 유럽연합을 대상으로 자료를 조사하였다. 미국의 경우 '2014 National Emissions Inventory, version 1 Technical Support Document'를 중심으로 과거에 발간되었던 관련 문헌들을 함께 조사하였으며(EPA 2016), 유럽의 경우 'EMEP/EEA air pollution emission inventory guidebook 2016' 자료를 활용하였다(EEA 2016).

## 2. 국내·외 인벤토리 내 암모니아 배출원 체계 비교

미국의 인벤토리에서 암모니아 배출원은 배출원 분류 코드(source classification codes; SCC)로 구분되며, SCC는 level 1에서 4까지 총 10자리의 숫자로 표현된다. 축산 분야에서 배출되는 배출원의 경우, level 1은 면단위 비점오염원으로 분류되어 28로 시작하며, level 2의 경우 가축은 05, 반려동물은 06, 야생동물은 07로 구분하고 있다(Table 1). Level 3은 축종별, 사육형태별, 분뇨의 성상별로 구분하여 3자리 숫자(XXX)로 표현되며, 마지막 level 4는 분뇨의 처리과정(사육시설, 저장 및 처리방법, 살포 등)으로 구분하여 3자리 숫자(ZZZ)로 표현하고 있다(Table 2). 닭을 포함하는 가금류의 경우 분뇨의 성상에 따라 건조분뇨와 습식분뇨로 구분하고, 젖소의 경우에는 flush 사육시설과 scraper 사육시설, deep pit 사육시설로 구분하고 있다. 돼지 돈사의 경우 그 분류체계를 라군을 이용하는 시설과 일반적인 deep-pit로 구분한다. 총 암모니아 배출량(kg year<sup>-1</sup>)은 Carnegie mellon university (CMU) 모델을 이용해 배출계수를 산정하고, 여기에 지역별 가축 두수(head)를 곱해 산정한다. 동일 축종일지라도 지역마다 개별적인 자체 배출계수를 산정하고 있으며, 주마다 일일(daily) 또는 월별(month) 단위로 시간적 스케일을 다르게 적용하고 있는 것이 특징이다.

유럽의 경우 배출원 분류코드 대분류는 1부터 11까지 있으며 그 중 농업은 3번으로, 세부적으로는 3.B에서 분뇨 관리로 나누어 축종별로 분류하고 있다. 그 외에도 3.D.a.1과 3.D.a.3에서도 암모니아 배출원이 있는 것으로 확인된다(Table 3). 유럽 또한 미국과 마찬가지로 배출량 산정 시 분뇨의 발생, 저장, 처리, 살포 등 과정으로 세분화하여 다루고 있는 것이 특징이다. 반면 미국과 달리 유럽연합 28개국(EU-28)은 나라별 자료 확보 및 활용 여부에 따라 배출량 산정 절차를 Tier 1, Tier 2 그리고 Tier 3로 나누고 있는 것이 유럽 배출원 및 배출계수의 특징이다. Tier 1은 가장 간단한 배출량 산정방법으로, 연중평균개체수(annual average population; AAP) 활동도와 배출계수의 곱으로 배출량을 산정하기 때문에 암모니아 발생 과정을 상세히 세분화되지 못하고 있다. 따라서 일반적으로 축종별로 분뇨의 성상 또는 총 발생량 정도로 배출계수를 구분하고 있다. Tier 2는 총 암모니아성 질소(total ammoniacal nitrogen; TAN)를 기준으로, 물질수지(mass balance)를 이용해, 분뇨관리 과정에 따른 발생량을 사육, 마당, 저장시

**Table 1.** Source classification codes of emission sources in the US (EPA 2016)

Emission source	Source classification codes
Agricultural Production-Crops	2801XXXZZZ
Agricultural Production-Crops as Event	2811XXXZZZ
Other combustion as Event	2811XXXZZZ
Agricultural Production-Livestock	2805XXXZZZ
Domestic animal waste emissions	2806XXXZZZ
Wild animals waste emissions	2807XXXZZZ
Other combustion	2810XXXZZZ
Cooling towers	2820XXXZZZ
Catastrophic/Accidental releases	2830XXXZZZ
Automotive repair shops	2840XXXZZZ
Miscellaneous repair shops	2841XXXZZZ
Health services	2850XXXZZZ
Laboratories	2851XXXZZZ
Fluorescent lamp breakage	2861XXXZZZ
Swimming pools	2862XXXZZZ

설, 살포, 방목 등 세분화하여 배출계수를 산정한다. 마지막 Tier 3는 시설 자체적으로 배출량 산정을 위한 접근법으로 개별 시설별로 고유의 배출계수를 산정하여 활용하는 것이 특징이다.

유럽에서 배출계수가 산정되어있는 축종은 젖소, 젖소가 아닌 소, 양, 돼지, 버팔로, 산양, 말, 당나귀/노새, 닭(산란계, 육계), 칠면조, 오리, 거위, 모피동물, 낙타 등이다. 축종에 대하여 기본적으로 Tier 1과 Tier 2에서 산정하는 배출계수의 단위가 상이한데, 특히 분뇨 처리 과정 중 ‘spreading’ 즉 토양에 살포하는 과정에서 암모니아 발생이 가장 많은 것으로 나타나는 것이 공통적인 특징이다. 또한 동일 축종에 대한 활동도의 경우 Tier 1은 연중평균개체수를 고려하여 ‘년’ 단위로 접근하고 있는 반면, Tier 2에서는 ‘일’ 단위 수준으로 산정하는 것이 주요 차이점이다. 젖소의 배출계수를 예를 들면, Tier 1에서는 분뇨의 성상에 따라 슬러리와 고체로 구분한다. 각각의 성상에 대해 총량(total)과 사육저장시설(housing storage and yards)로 구분하고 있다. Tier 2에서는 묶여있는 젖소와 일반 젖소로 구분하고 각각에 대해 분뇨의 성상을 슬러리와 고체로 나눈다. 그리고 각 성상별로 배출계수를 housing, storage, yard, spreading, 그리고 grazing/outdoor로 구분하고 있다.

국내 농업 관련 암모니아 배출원 및 분류체계는 국가 대

**Table 2.** Source classification codes (SCC) of livestock manure in the US (EPA 2016)

SCC	Description
2805001100	Beef cattle-finishing operations on feedlots (drylots); Confinement
2805001200	Beef cattle-finishing operations on feedlots (drylots); Manure handling and storage
2805001300	Beef cattle-finishing operations on feedlots (drylots); Land application of manure
2805002000	Beef cattle production composite; Not Elsewhere Classified
2805003100	Beef cattle-finishing operations on pasture/range; Confinement
2805007100	Poultry-layers with dry manure management systems; Confinement
2805007300	Poultry-layers with dry manure management systems; Land application of manure
2805008100	Poultry-layers with wet manure management systems; Confinement
2805008200	Poultry-layers with wet manure management systems; Manure handling and storage
2805008300	Poultry-layers with wet manure management systems; Land application of manure
2805009100	Poultry-broilers; Confinement
2805009200	Poultry-broilers; Manure handling and storage
2805009300	Poultry-broilers; Land application of manure
2805010100	Poultry-turkeys; Confinement
2805010200	Poultry-turkeys; Manure handling and storage
2805010300	Poultry-turkeys; Land application of manure
2805018000	Dairy cattle composite; Not Elsewhere Classified
2805019100	Dairy cattle-flush dairy; Confinement
2805019200	Dairy cattle-flush dairy; Manure handling and storage
2805019300	Dairy cattle-flush dairy; Land application of manure
2805020002	Cattle and Calves Waste Emissions; Beef Cows
2805021100	Dairy cattle-scrape dairy; Confinement
2805021200	Dairy cattle-scrape dairy; Manure handling and storage
2805021300	Dairy cattle-scrape dairy; Land application of manure
2805022100	Dairy cattle-deep pit dairy; Confinement
2805022200	Dairy cattle-deep pit dairy; Manure handling and storage
2805022300	Dairy cattle-deep pit dairy; Land application of manure
2805023100	Dairy cattle-drylot/pasture dairy; Confinement
2805023200	Dairy cattle-drylot/pasture dairy; Manure handling and storage
2805023300	Dairy cattle-drylot/pasture dairy; Land application of manure
2805025000	Swine production composite; Not Elsewhere Classified
2805030000	Poultry Waste Emissions; Not Elsewhere Classified
2805030007	Poultry Waste Emissions; Ducks
2805030008	Poultry Waste Emissions; Geese
2805035000	Horses and Ponies Waste Emissions; Not Elsewhere Classified
2805039100	Swine-operations with lagoons (unspecified animal age); Confinement
2805039200	Swine-operations with lagoons (unspecified animal age); Manure handling and storage
2805039300	Swine-operations with lagoons (unspecified animal age); Land application of manure
2805040000	Sheep and Lambs Waste Emissions; Total
2805045000	Goats Waste Emissions; Not Elsewhere Classified
2805047100	Swine-deep-pit house operations (unspecified animal age); Confinement
2805047300	Swine-deep-pit house operations (unspecified animal age); Land application of manure
2805053100	Swine production-outdoor operations (unspecified animal age); Confinement
2806010000	Domestic Animals Waste Emissions; Cats; Total
2806015000	Domestic Animals Waste Emissions; Dogs; Total
2807020001	Wild Animals Waste Emissions; Bears; Black Bears
2807020002	Wild Animals Waste Emissions; Bears; Grizzly Bears

**Table 3.** Nomenclature for reporting (NFR) emission sources in Europe (EEA 2016)

NFR	Emission source
1	Energy
2	Industrial processes & Product use
3	Agriculture
3.B	Manure management
3.B.1.a	Dairy cattle
3.B.1.b	Non-dairy cattle
3.B.2	Sheep
3.B.3	Swine
3.B.4.d	Goats
3.B.4.e	Horses
3.B.4.gi	Laying hens
3.B.4.gii	Broilers
3.B.4.giii	Turkeys
3.B.4.giv	Other poultry
3.B.4.h	other animals
3.D	Agricultural soils
3.D.a.1	Manure applied to soils
3.D.a.2.b	Animal manure applied to soils
3.D.a.2.c	Other organic fertilizers applied to soils
3.D.a.3	Excreta deposited by grazing livestock
3.D.b	Indirect emissions from managed soils
3.D.c.	Farm-level agricultural operations including storage, handling and transport of products
3.D.f.	Use of pesticides
3.F	Field burning of agricultural waste
3.I	Other
5	Waste
6	Other
11	Natural sources

기오염물질 배출량 산정방법 편람(III)을 통해 확인할 수 있으며(NIER 2008), 비료사용농경지 이외의 분뇨관리 부분은 Table 4와 같다. 소는 젖소와 식용 일반소로 구분하며, 일반소는 연령별로 1년 미만, 1~2년, 2년 이상으로 구분하고 있다. 일반적으로 식용 소의 사육 기간이 3년인 점을 고려해볼 때 1년 단위로 나누고 있어 합당한 것으로 보이며, 연령 증가에 따라 배출계수 또한 높아지는 것으로 확인되었다. 돼지의 경우 모돈인 암돼지의 배출계수가 가장 높게 나타났으며, 수명 120일 정도의 비육돈을 기준으로 월령별로 자돈과 육성돈으로 세분화하고 있다. 닭의 경우 산란용과 육계로 구분하고 있으며, 나머지 축종에 대해서는 하나의 축종에 하나의 배출계수를 이용하고 있다.

국외에 비하여 상대적으로 국내의 가축분뇨 배출계수가 세분화되지 못한 데에는 가축 사육 환경의 차이가 큰

영향을 미치게 된다. 국외의 경우 넓은 부지를 바탕으로 방목 또는 넓은 운동장 등의 사육시설을 활용하며, 자체 처리 시설에서 발생된 분뇨를 자체 처리하는 순환 체계를 갖는 경우가 많다. 따라서 별도의 자원화 시설을 거치기 보다는 두엄(farm yard manure) 또는 라군(lagoon)과 같은 단순 저장 및 간헐적 폭기 방식으로 자원화한다. 그러나 국내의 경우 대부분의 경우에 별도의 사육시설에서 집중 사육을 하며, 농장과 별도의 자원화시설을 통해 분뇨를 처리하고, 농경지에 살포함으로써 가축사양과 경종이 분리되어 있는 것이 특징이다(Sung *et al.* 2000). 이는 발생한 분뇨를 해당 지역에서 자체 처리하여 소비하는 시스템인 지역단위 양분총량제를 국내에 적용하기 어려운 이유이기도 하다(Kim and Kim 2006). 이와 관련하여 Lee and Yoon (2019)은 도 단위 양분부하와 양분수지 지표를 산출하고

**Table 4.** Source classification codes (SCC) of livestock manure in Korea (NIER 2008) and comparison with EU-28 emission factor

Korea				EU-28		
SCC	Subclass	Subdivision	Emission factor (kg-NH <sub>3</sub> head <sup>-1</sup> )	Emission factor (Tier 1)		Unit
10020100	Dairy cattle		24.60	Slurry	39.3	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
				Solid	28.7	
10020201	Beef cattle	Under 1 yeas old	11.80	Young	13.4	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020202	Beef cattle	1-2 years old	14.00			
10020203	Beef cattle	Over 2 years old	16.80	Other	9.2	
10020301	Swine	Nursery pig	4.40	Fatten	Slurry	6.7
10020302	Swine	Glowing pig	8.70		Solid	6.5
10020303	Swine	Fatting pig	11.40	Sow	Slurry	15.8
10020304	Swine	Sow	21.40		Solid	18.2
10020401	Poultry	Laying hen	0.37		0.48	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020402	Poultry	Broiler	0.28		0.22	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020501	Other poultry	Duck	0.92		0.66	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020502	Other poultry	Geese	0.92		0.35	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020503	Other poultry	Turkey	0.92		0.95	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020601	Sheep and lamb	Sheep	0.46		1.4	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020602	Sheep and lamb	Lamb	0.46		1.4	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020701	Perissodactyls	Horse	5.10		14.8	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020702	Perissodactyls	Mule	5.10		14.8	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020703	Perissodactyls	Donkey	5.10		14.8	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020801	Fur animal	Mink	1.69		0.02	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020802	Fur animal	Fox	1.69		0.02	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020803	Fur animal	Rabbit	1.69		0.02	kg a <sup>-1</sup> AAP <sup>-1</sup>
10020901	Others	Dog	2.50		-	-
10020902	Others	Deer	1.10		-	-
10020903	Others	Cat	0.83		-	-

**Table 5.** Comparison of the amount of ammonia emissions in Korea, the US, and EU-28

	Korea	US	EU-28
NH <sub>3</sub> total emissions	29 million ton	357 million ton	400 million ton
NH <sub>3</sub> emissions from manure	21 million ton	216 million ton	340 million ton
Area	10 million km <sup>2</sup>	980 million km <sup>2</sup>	447 million km <sup>2</sup>
NH <sub>3</sub> emission per area	2.1 million ton km <sup>-2</sup>	0.22 million ton km <sup>-2</sup>	0.54 million ton km <sup>-2</sup>
Reference year	2015	2017	2015

비교를 하였으며, 그 결과 대기를 통해 연간 3만 6천 톤의 질소가 토양으로 유입되고, 4만 9천 톤의 질소가 토양에서 대기로 배출되는 것으로 나타났다. 그러나 생물학적 탈질 과정을 통한 N<sub>2</sub>O의 유출을 중점으로 산출하여, 향후 암모니아 거동을 고려한 양분부하 및 양분수지 분석이 수행되어야 할 것이다.

종합해보면, 국내의 지리적, 환경적 한계로 인해 축산업 시스템이 국외와 달라 분류체계가 다양화되지 못한 까닭에 미국은 50개, 유럽은 151개의 암모니아 배출 분류체계를 갖고 있는 반면, 국내 현행 분류체계는 24개로 구분하고 있어 미국의 절반수준, 유럽의 1/6 수준의 배출원 분류체계를 갖고 있는 것으로 나타났다. 따라서 국내 실정에

맞는 수준에서 분류체계를 다양화함으로써 누락 배출원을 최소화하는 작업이 필요할 것이다.

### 3. 우리나라 분뇨관리 부문 암모니아 배출량

2015년 우리나라에서 배출된 암모니아 총량은 29만 7천 톤으로, 이 중 23만 1천 톤(77.8%)이 농업부문 배출이다. 농업부문 내에서는 ‘분뇨관리’에서 21만 1천 톤의 암모니아가 발생하는 것으로 산정되어, 결국 전체 배출량의 71%가 축산과 관련한 부문에서 배출되는 것으로 확인되었다. 분뇨관리에서 발생한 축종별 암모니아 배출량은 Fig. 1과 같다. 돼지가 9만 5천 톤으로 분뇨관리 발생 암모니아의 45% 수준으로 가장 많은 암모니아를 배출하였으며, 닭(산란계, 육계), 일반소, 그리고 젖소 순으로 많이 배출하였다. 분뇨관리에서 발생한 21만 1천 톤의 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 질소(N)를 기준으로 환산하면 17만 4천 톤의 질소가 대기 중으로 배출된 셈이다. 일반소, 젖소, 돼지, 산란계, 그리고 육계 등 주요 5대 축종만을 대상으로 할 경우, 19만 8천 톤의 암모니아 또는 16만 3천 톤의 질소가 대기 중으로 배출되었다고 볼 수 있다.

국내 농업-분뇨관리 부문 암모니아의 배출량은 기본적으로 축종별 배출계수(kg-NH<sub>3</sub> head<sup>-1</sup>)에 활동도(head year<sup>-1</sup>)를 곱하여 산정하고 있다. 현재 사용하고 있는 배출계수는 대부분 유럽환경청에서 2007년에 발표한 자료(EEA 2007)와 미국환경보호국에서 1994년에 발표한 자료(EPA 1994)를 이용하고 있으며, 일반소, 돼지, 사슴, 고양이에 대해서는 2008년에 국립환경과학원의 연구결과(NIER 2008)를 이용하고 있다(Table 4). 예를 들면, 소의 배출계수는 1차적으로 연령별(1년 미만, 1~2년, 그리고 2년 이상)로 구분하고, 각 연령별로 우사와 퇴비장에서 각각 계절별로 실측한 자료와 토양 시비 과정에서 발생하는 문헌 값을 합하여 배출계수를 산정한다. 그러나 분뇨관리 부문에서 암모니아의 발생은 같은 축종일지라도, 사육방식, 분뇨의 성상, 분뇨처리방식, 계절 등에 따라 발생하는 차이가 충분히 반영되지 못하고 있으며 또한 연중 동일하게 배출되는 것으로 가정하고 평균 값을 사용하고 있는 점이 앞서 소개된 미국과 유럽의 배출계수의 큰 차이이자 국내 산정 과정의 한계라 할 수 있다(Shin et al. 2017). 축종별 사육 두수에 해당하는 활동자료는 농림축산식품부와 통계청에서 집계하는 자료를 활용하고 있으나 이는 사육도중 폐사되는 가축과 축종별 사육기간 즉 연간 사육횟수

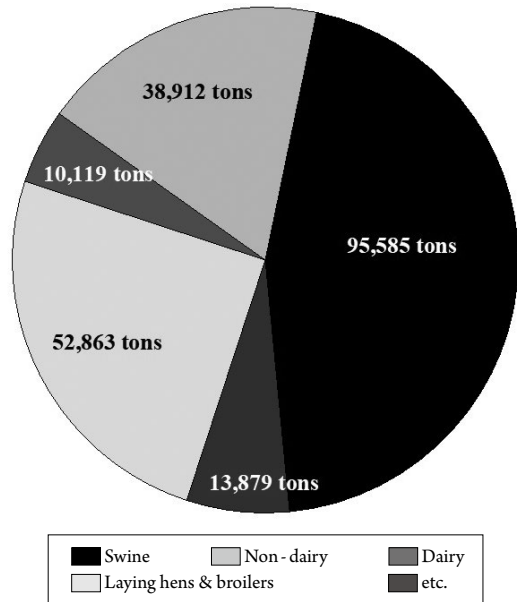


Fig. 1. Amount of ammonia emission from livestock manure for the five major animal species in 2015.

등이 충분히 반영되지 못한다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 미국에서는 주(state), 도(county)별로 일일 배출계수를 적용하고 합산하여 연간 총 배출량을 산정하고 있다(EPA 2016). 유럽에서는 축종별 사육기간을 고려한 연중평균개체수(annual average population; AAP)를 활동도 자료로 활용하여 정확도를 향상시키고 있다(EEA 2016). 우리나라, 미국, 유럽의 연간 암모니아 총 배출량 비교는 Table 5와 같다. 그 결과 분뇨관리에서 발생하는 총 배출량은 유럽이 약 340만 톤, 미국이 216만 톤으로, 우리나라 배출량에 비해 각각 16배, 10배 높게 나타났다. 그러나 단위면적당 배출량을 비교해보면 유럽에 비해 4배, 미국에 비해 10배 이상 높게 나타났다. 우리나라의 배출량 산정방법이 과소평가 되고 있는 점을 고려해볼 때, 국내 단위 면적당 배출량은 매우 높은 편이라 볼 수 있다.

우리나라의 현행 배출계수의 타당성과 적합성을 확인하기 위하여 배출계수의 시간적 단위가 1년으로 동일한 유럽의 Tier 1과 비교하였다(Table 4). 우선 젖소의 경우 국내의 배출계수는 24.60 kg head<sup>-1</sup>이며, 유럽의 경우 slurry 39.3 kg a<sup>-1</sup> AAP<sup>-1</sup>, solid 28.7 kg a<sup>-1</sup> AAP<sup>-1</sup>로 조금 높은 값을 보여주고 있다. 일반소의 경우에는 어린 소는 국내의 배출계수가 조금 높은 것으로 나타났다. 돼지의 경우 국내는 자돈, 육성돈, 비육돈, 모돈으로 세분화하여 4.40 kg head<sup>-1</sup>

부터 21.40 kg head<sup>-1</sup>까지 여러 배출계수를 활용하고 있는 반면, 유럽의 경우 비육, 모돈 두 가지로만 나누고 있으며 국내의 배출계수가 유럽에 비해 높게 나타났다. 닭의 경우 산란계는 유럽이, 육계는 국내가 조금 높은 값을 사용하고 있었으며, 기타 가금류도 유사한 경향을 보여주었다. 주요 축종 이외의 기타 가축들의 경우 국내와 유럽의 차이가 상당히 크게 나타났는데, 이는 지역별 사육목적, 선호 품종 등에 차이가 있는 것에 기인한 것으로 판단된다. 암모니아 배출의 대부분을 차지하는 주요 축종(젓소, 일반소, 돼지, 가금류)을 대상으로 우리나라와 유럽 배출계수의 상관성을 확인하였다(Fig. 2). 그 결과,  $r$  값이 0.9042로 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 회귀식의 기울기는 1.16으로 국내에 비해 유럽의 계수가 전반적으로 높게 나타났으나 기울기가 1에서 크게 벗어나지 않는 것을 미루어보아 타당한 수준의 배출계수를 이용하고 있는 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 국내 암모니아 배출량 산정의 정확도 향상을 위하여 배출계수 및 활동도 자료 또한 시공간적 스케일을 향상시켜야 할 것이며, 특히 가축으로부터의 배출 이후 과정에 대한 세분화 작업이 필요할 것이다.

#### 4. 가축분뇨 기원 질소 및 암모니아의 거동

가축에서 배설된 분뇨의 처리 과정을 살펴보면, 우리나라에서는 소와 돼지는 월령별로, 그 외 가축에 대해서는 축종별로만 구분하고 있으나, 미국에서는 축종별로 시설(confinement), 저장고(manure storage), 그리고 토양 살포(land application) 과정으로 구분하고 있다. 유럽의 경우 각 나라별 자료의 확보와 활용 여부에 따라 Tier 1, 2, 3 접근법으로 나누어 배출계수를 이용하고 있다. Tier 1에서는 축종별로 분뇨의 성상(slurry, solid, litter outdoor)을 일차적으로 구분하고, 각각의 성상에 대해 총 합계(total)와 저장시설 및 마당(housing storage and yards) 두 개로 나누어 배출계수를 제시하고 있다. Tier 2에서는 시설(housing), 저장(storage), 마당(yards), 살포(spreading), 그리고 방목(grazing/outdoor) 등 5개로 세분화하여 발생한 분뇨의 단계별 배출계수를 활용하고 있다. 활동자료의 경우 미국과 유럽은 일(day) 기준으로 적용하고 있는 반면 우리나라의 경우 년(year)을 기준으로 계산하기 때문에 배출량 산정 시 정확도와 신뢰도가 상대적으로 낮을 수밖에 없을 것이다.

사육시설 내 가축에서 배설된 분과뇨는 가축의 종류와

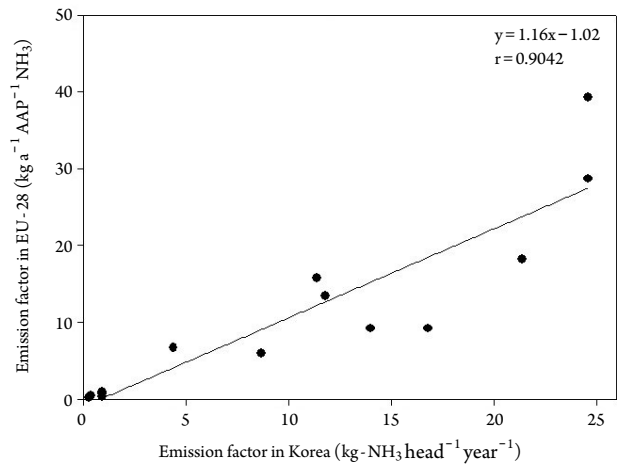


Fig. 2. Comparison of the major livestock NH<sub>3</sub> emission factors between Korea and EU-28 for the verification of emission factors.

축사의 형태 및 구조에 따라 다양한 형태로 서로 다른 기간 동안 사육시설 내에 저장 및 방치된다. 쌓여있는 분뇨는 농장 경영인의 관리에 따라 주기적으로 사육시설 외부의 저장시설에서 보관된 후 외부의 위탁시설에서 처리되거나, 농장 내부의 처리시설(고액분리, 퇴비화, 액비화, 정화처리 등)에서 자체 처리한다. 분뇨를 자체처리하는 농가의 경우 생산된 퇴액비의 저장시설을 갖추고 있는 경우가 많다. 사육시설을 기준으로 살펴보면 사육시설 내부, 외부의 저장시설, 퇴비화 또는 액비화시설, 퇴액비 저장고 등에서 암모니아가 발생하게 된다.

전국의 축산 농가에서 발생한 가축분뇨는 일반적으로 퇴비화, 액비화, 에너지화 및 정화방류를 통해 처리된다. 가축분뇨의 자원화는 퇴비화 또는 액비화 과정을 거쳐 농경지에 환원하거나 혐기소화 과정으로 유용 가스(메탄)를 회수하여 에너지화하는 과정을 포함한다. 정화처리하는 분뇨를 정화 처리하여 방류수 수질기준을 충족시켜 인근 수계로 방류하는 방법을 말한다(Kim 2017). 환경부 보고에 따르면, 2017년 발생한 가축분뇨의 90%가 퇴비화 및 액비화를 통해 자원화되었고, 8.2%는 개별 시설과 공공처리시설에서 처리되고, 1.2%가 자연증발 된 것으로 보고 있다(MOE 2018). 국내 가축분뇨 퇴비화 시설은 환경부가 지원·관리하는 ‘가축분뇨공공처리장’과 농림축산식품부가 지원·관리하는 ‘공동자원화시설’로 구분된다. 2017년 기준 전체 가축분뇨의 10%는 공공처리장(105개)을 통해 처리되었고, 나머지 90%는 공동자원화시설(95개)에서 처



리되었다. 가장 많은 가축분뇨를 처리하는 퇴비화 공정은 크게 폐기물선별, 분쇄, 분해, 양생, 건조 및 마무리 단계로 이루어지며 전체 공정은 약 2~3개월 소요된다. 퇴비화는 비교적 고온(40~50°C)에서 이루어지는 미생물에 호기성 분해공정으로, 원활한 퇴비화를 위해 수행하는 주기적인 교반 과정에서 암모니아가 다량 발생하는 것으로 알려져 있다. 액비화 과정 역시 호기성 미생물을 이용한 분해공정으로 폭기과정에서 암모니아가 다량 발생하게 된다. 좁은 국토 면적에서 많은 두수의 가축을 사육하고 분뇨를 처리할 수 있는 공간이 충분하지 못한 상황에서, 전국에 걸쳐 분포하고 있는 축산농가 및 공동처리시설에서 발생하는 암모니아의 비중이 클 것으로 판단되고 암모니아 발생의 공간적 분포에도 큰 영향을 줄 수 있는 발생오염원으로 볼 수 있다. Jeong and Kim (2000)에 의하면 1차 퇴비화 공정 단계에서 분뇨 내 질소의 28~38%가 암모니아 형태로 손실되었으며 전환된 암모니아의 77~94%가 가스형태로 휘발되었으며, 암모니아의 손실량은 퇴비화 과정에서 주입된 공기량에 큰 영향을 받는 것으로 나타나, 공동자원화시설에서의 암모니아 배출 기여가 상당함을 보여주었다.

가축분뇨에서 기원한 퇴액비는 계절 변화에 따른 농업 활동 및 작부체계에 맞춰 농경지에 살포된다. 퇴액비의 특성은 그 원료가 되는 분뇨의 축종에 따라 조금씩 상이하지만, 토양 살포 후 퇴액비 내 질소는 살포 이후 지표면에서 암모니아 형태로 가장 쉽고 빠르고 많이 대기 중으로 휘발되며 또는 아질산염, 질산염, 암모늄 이온의 형태로 지하수로 침출·유실되기 쉽다(Sommer 2001). 종합해보면 퇴액비 중 질소는, ① 토양에 살포 및 살포된 후 표면에서 암모니아로 휘발되거나, ② 이온형태로 식물뿌리를 통해 흡수되고 ③ 심토로 침출되거나 ④ 나머지는 토양 교질 입자 표면에 흡착될 것이다. 따라서 국내 암모니아 인벤토리의 배출계수의 정확도 향상과 세분화를 위해서는 위의 여러 과정들 가운데 특히 국내 실정에 영향을 많이 받는 ① 과정과 관련한 심도 있는 배출계수 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 5. 퇴비·액비 기원 암모니아 배출계수 산정 방법

자원화 과정을 통해 생성된 퇴액비를 토양 살포에 따른 질소의 거동 연구는 오래전부터 수행되어왔다. Eghball (2000)은 생분뇨와 분뇨퇴비를 토양에 사용한 경우 1작

기 동안 각각 20%와 11%의 질소가 무기화되고 퇴비화 과정을 거쳐 안정한 유기성 형태로 전환되면 무기화 속도가 느려지는 것을 보고하였다. Ahn *et al.* (2013)은 계분과 돈분 내 질소의 형태를 분석한 결과, 계분의 경우 총 질소의 8%가 암모니아성 질소로 존재하였고 돈분의 경우 총 질소의 0.7%만이 암모니아성 질소로 존재하고 있어서, 액비에 비해 암모니아로 휘발되는 것이 쉽지 않음을 보고하였다. Kim *et al.* (2017)은 액비를 논에 살포하였을 때 질소의 거동을 fugacity-based multimedia environmental fate model을 이용하여 확인한 결과 표토에 30%, 심토에 30%, 토양수에 23%, 나머지 16%는 식물로 전이됨을 확인한 바 있다. Hwang *et al.* (2018)은 우분(질소함량 2.4%), 돈분(질소함량 1.6%), 계분(질소함량 3.0%)의 부숙퇴비를 토양에 처리하고 질산염의 이동양상을 조사한 결과, 토양 살포시 토양 미생물에 의해 쉽게 질산화되어 질산태 질소로 전환되며, 질산염의 거동은 투수성 특히 점토의 함량에 영향을 많이 받는다고 하였다.

퇴액비를 토양에 살포한 후 암모니아 발생량에 영향을 미치는 요인은 크게 ① 퇴비·액비의 특성 ② 기후 인자 ③ 토양 특성 등으로 나누어 볼 수 있다. 일반적으로 퇴비와 액비의 pH가 높고 총 암모니아성 질소(TAN)의 농도가 높을수록 암모니아 휘발이 촉진되어 배출량 또한 증가한다(Sommer *et al.* 2003; Nyord *et al.* 2008). 그리고 기온이 따뜻하고 바람이 강할수록 암모니아 배출이 증가하며(Sommer *et al.* 1991; Sommer and Hutchings 2001), 토양의 수분함량이 높고 거대공극이 적을수록 암모니아 배출이 증가하는 것으로 알려져 있다(Sommer *et al.* 2003; Shim *et al.* 2014). 그러나 국내 실정을 고려한 암모니아 배출계수 산정과 고도화 작업을 위해서는 퇴액비 특성과 토양특성, 그리고 기후 인자가 복합적으로 작용할 때 암모니아 휘발에 미치는 영향에 관한 연구가 필수적으로 선행되어야 하나 관련 연구들은 미비한 실정이다. 여러 복합 인자들을 동시에 독립변수로 활용하는 경우에는 개방된 현장에서의 실측 실험은 많은 어려움이 따르며, 정교한 실험조건 조절이 가능한 챔버를 활용하는 것이 그 대안이 될 수 있다.

Jeon *et al.* (2005)은 하수처리장에서 부유형 챔버를 통해 암모니아 배출 특성을 평가하여 암모니아는 폭기과정에서 가장 많이 배출되며 표면 특성의 중요성을 강조하였다. Sa and Jeon (2010)은 유사한 챔버를 이용하여 소 사육시

설에서 소 연령과 계절에 따른 암모니아 배출량을 평가하기도 하였다. 위 챔버 방법은 액비 자원화 시설과 토양 표면에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. Kim *et al.* (2012)은 논에서 헤어리베치 시용에 따른 암모니아 휘산을 평가하기 위해 챔버와 황산용액 포집 방법을 사용하였으며, Hyun *et al.* (2017)도 현장에서 오픈 챔버를 이용하여 토양에 비료를 투입한 이후 headspace 포집법을 통해 질소의 배출량을 평가하고 기상인자, 토양 내 무기태 질소량, 토양 수분함량이 큰 영향을 미치는 것을 보고하였다. 최근 Kim *et al.* (2020)은 토양의 특성, 퇴액비의 특성이 암모니아 휘발에 미치는 영향을 평가할 수 있는 역학 챔버 포집 시스템(dynamic chamber - capture system; DCS)을 제작하여 그 적용가능성을 확인하였다. 이 방법은 토양, 식물, 식품 분야에서 질소 정량에 사용하는 kjeldahl 적정방법을 인용한 것으로, 기존 대기오염공정시험법 또는 악취측정법에서 사용하는 암모니아 분석방법에 비해 사용되는 시약의 종류와 양이 상대적으로 적고, 실험과정이 비교적 빠르고 용이하기 때문에 인력의 소요 또한 적은 것이 장점이다. 따라서 챔버 시스템을 활용하면 정확한 시간 조절이 가능하기 때문에, 단위 시간 당 단위 면적(챔버 내부 면적)에서 발생하는 암모니아의 총량( $\text{mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ ), 즉 배출 유량(flux)을 산정할 수 있으며, 결과 자료의 축적과 데이터베이스화 구축은 향후 배출계수 산정 연구에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 적 요

국내 발생 암모니아 중 가축분뇨의 기여율이 높은 것은 자명한 사실이다. 암모니아 배출량 산정 과정의 정확도와 신뢰도 향상을 위해서는, 가축분뇨 발생량의 정확한 집계, 가축분뇨의 퇴비화 및 액비화 과정에서 단계별 암모니아 전환량과 발생량 산출, 퇴액비의 저장 및 운송과정에서의 암모니아 발생량 산정 그리고 토양 살포 과정과 방법에 따른 암모니아 발생량 비교 연구가 반드시 수행되어야 할 것이다. 미국과 유럽과 비교해 볼 때, 특히 국내 배출계수가 상대적으로 매우 획일적이고 시공간적으로 세분화되지 못해 국내 실정을 충분히 반영하지 못하고 있다. 암모니아 배출계수 산정의 정확도와 전문성을 향상 시킬 수 있는 방안으로, 퇴액비의 특성, 토양의 특성 그리고 기후 특성의 복합적인 고려가 가능한 챔버시스템을 활용할 수 있을 것

이다. 국내외 암모니아 배출과 관련한 자료의 검토와 비교를 통해 현재 국내 시스템의 부족한 점과 나아가야 할 방향을 확인할 수 있었으며, 암모니아 배출유량 산정이 가능한 챔버 시스템을 제안하였다. 향후 누락배출원의 신규 배출계수 산정과 같은 실질적인 정책과의 연계를 위해서는 실내의 챔버 시스템에서 더 나아가 현장에서의 mesocosom 시스템의 방법론 구축 또한 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

This research was mainly supported by National Research Foundation of Korea (NRF) [2019R111A1A01043684], and was partly supported by Korea University.

## REFERENCES

- Ahn JH, IH Song and MS Kang. 2013. Correlation between raw materials and chemical contents of livestock compost. J. Korean Soc. Agric. Eng. 55:37-45.
- Behera SN, M Sharma, VP Aneja and R Balasubramanian. 2013. Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. Environ. Sci. Pollut. Res. 20:8092-8131.
- Eghball B. 2000. Nitrogen mineralization from field applied beef cattle feedlot manure or compost. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 2024-2030.
- EEA. 2007. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2007. European Environment Agency. Copenhagen, Denmark.
- EEA. 2016. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016. European Environment Agency. Copenhagen, Denmark.
- EPA. 1994. Development and Selection of Ammonia Emission Factors (final report). Environmental Protection Agency. Washington, D.C., USA.
- EPA. 2016. 2014 National Emissions Inventory, Version 1. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., USA.
- Hodan WB and WR Barnard. 2004. Evaluating the contribution of PM<sub>2.5</sub> precursor gases and re-entrained road emissions to mobile source PM<sub>2.5</sub> particulate matter emissions. MACTEC Federal Programs, Research Triangle Park, NC.
- Hristov AN. 2011. Contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in the

- United States. *J. Dairy Sci.* 94:3130–3136.
- Hwang OH, SK Park, MW Jung, DW Han, WG Nho and SB Cho. 2018. Effects of pH modulation on the concentrations of odorous compounds from pit slurry of a pig operation building. *J. Odor Indoor Environ.* 17:1–10.
- Hyun J, SY Yoo, XY Yang, JE Lee and GY Yoo. 2017. Annual variability in nitrous oxide emission from agricultural field soils. *J. Climate Chang. Res.* 8:305–312.
- Jeon EC, JH Sa and JH Park. 2005. Development of NH<sub>3</sub> emission factors using a dynamic flux chamber in a sewage treatment plant. *J. Environ. Impact Assess.* 14:263–273.
- Jeong YG and JS Kim. 2000. An assessment on the behavior of nitrogenous materials during the first high rate phase in composting process. *J. Kor. Org. Resour. Recyc. Assoc.* 8:81–88.
- Kang TW, JN Halder, SR Kim, YM Yoon and MG Lee. 2017. Nutrient composition and heavy metal contents of matured livestock liquid fertilizer in Korea. *J. Kor. Org. Resour. Recyc. Assoc.* 25:31–39.
- Kim DH. 2017. Improving livestock environment for sustainable livestock production. *World Agric.* 204:1–19.
- Kim CG and TY Kim. 2006. Scheme for implementing regionally based maximum nutrients loading system. *Korean J. Agric. Manage. Policy* 33:326–350.
- Kim MS, WK Oh and DH Kwak. 2017. Behavior characteristics analysis of animal liquid manure and urea in the rice field using an fugacity-based multimedia environmental fate model. *J. Kor. Soc. Environ. Technol.* 18:546–562.
- Kim MS, YS Lee, HG Min and JG Kim. 2020. Applicability of the dynamic chamber-capture system (DCS) for estimating the flux of ammonia emission during liquid fertilizer spreading. *Atmos. Pollut. Res.* In press. DOI:10.1016/j.apr.2020.01.001.
- Kim TY, AR Daquiado, F Alam and YB Lee. 2012. Effect of application ratge of hairy vetch on ammonia emission from paddy soil. *Korean J. Environ. Agric.* 31:375–377.
- Lee JH and YM Yoon. 2019. Comparison of nutrient balance and nutrient loading index for cultivated land nutrient management. *Korean J. Environ. Biol.* 37:554–567.
- MAFRA. 2018. Agriculture, Food and Rural Affairs Statistic Yearbook. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Sejong, Korea.
- ME. 2018. White Paper of Environment 2018. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- NIER. 2008. National Air Pollutant Emission Estimation Manual (III). National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- Nyord T, KM Schelde, HT Søgaard, LS Jensen and SG Sommer. 2008. A simple model for assessing ammonia emission from ammoniacal fertilisers as affected by pH and injection into soil. *Atmos. Environ.* 42:4656–4664.
- Sa JH and EC Jeon. 2010. Estimation of ammonia flux and emission factor from cattle housing using dynamic flux chamber. *J. Environ. Health Sci.* 36:33–43.
- Shim HY, KS Lee, DS Lee, DS Jeon, MS Park, JS Shin, YK Lee, JW Goo, SB Kim, SG Song and DY Chung. 2014. Infiltration rates of liquid pig manure with various dilution ratios in three different soil. *Korean J. Environ. Agric.* 33:164–168.
- Shin DW, HS Joo, E Seo and CY Kim. 2017. Management Strategies to Reduce PM-2.5 Emission: Emphasis-Ammonia. Korea Environment Institute. Sejong, Korea.
- Sommer SG, JE Olesen and BT Christensen. 1991. Effects of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. *J. Agric. Sci.* 117:91–100.
- Sommer SG and NJ Hutchings. 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction invited paper. *Eur. J. Agron.* 15:1–15.
- Sommer SG, S Genermont, P Cellier, NJ Hutchings, JE Oleson and T Morvan. 2003. Processes controlling ammonia emission from livestock slurry in the field. *Eur. J. Agron.* 19:465–486.
- Sung KI, BW Kim and CW Chung. 2000. Development trend in sustainable and low input system for livestock production. *Ann. Ani. Resour. Sci.* 11:188–194.
- Yoon YM, SE Lee, DY Chung, GY Cho, JD Kim and CH Kim. 2008. The analysis of environmental loads and material recycling of the nutrients by the livestock wastewater originating from imported feeds. *J. Korean Soc. Grassl. Forage Sci.* 28:139–154.