

개방형 산란계사의 암모니아 배출계수 개발을 위한 추적가스법 적용 연구

강성민* · 노준영** · 김고은*** · 전의찬****†

*세종대학교 기후환경융합센터 선임연구원, **세종대학교 기후환경융합학과 박사과정생,
세종대학교 기후에너지융합학과 석박사통합과정생, *(사)한국기후환경원 원장

A Study on the Applicability of the Trace Gas Method for Development of Ammonia Emission Factors in Open Laying Hens Houses

Kang, Seong Min* · Rho, Joon Young** · Kim, Go Eun*** and Jeon, Eui-Chan****†

*Senior Researcher, Department of Climate and Environment, Sejong University Graduate School, Korea

**Ph.D. Student, Department of Climate and Environment, Sejong University Graduate School, Korea

***Ph.D. Student, Department of Climate and Energy, Sejong University Graduate School, Korea

****Director, Korea Institute of Climate Change & Environment, Seongnam, Korea

ABSTRACT

Ammonia is one of the precursors for secondary generation of PM-2.5 and is one of the important factors in PM-2.5 management. The livestock sector is the main source of ammonia emission in Korea; except for cattle and pigs, overseas emission factors are used. In Korea, research on the development of emission factors in the livestock sector has been mainly conducted using the chamber method, but this method has disadvantages in that it is difficult to consider the actual ventilation amount in the livestock house and it is not possible to monitor ammonia emission in real-time.

In this study, the applicability of the tracer gas method used abroad was investigated to compensate for these shortcomings. The experiment was conducted for open-type laying hens and was performed according to the Vera test protocol, an overseas standard.

The tracer gas method showed no significant difference in domestic and overseas emission factors, so it is judged that the tracer gas method can be fully utilized. Therefore, in this study, NH₃ emission factors have been developed by methods other than the chamber method mainly used in livestock houses. It is necessary to apply and verify this method in more places in the future, and it is judged that it is necessary to conduct research on other livestock as well.

Key words: Open Laying Hens Houses, Precursors for Secondary Generation, Ammonia Emissions Factor, Vera Test Protocol, Tracer Gas Method

1. 연구배경 및 목적

세계보건기구(WHO)가 2013년 1군 발암 물질 중 하나로 미세먼지를 포함하면서, 전세계적으로 미세먼지에 대한 관심이 커졌다. 우리나라는 미세먼지 관련 정책 시행과 COVID 19의 영향에 따라 2020년 미세먼지 농도가 2019년 대비 약 21% 저감되었다. 하지만, 2021년 국내 초미세먼지 농도는 WHO의 강화된 초미세먼지 연평균 농도

기준인 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하보다 높았으며, 국내 60여개 도시 중 5개 도시만이 국내 대기 환경 초미세먼지 농도 기준인 연평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 조사되어 초미세먼지 농도는 여전히 많은 관리가 필요하다(IQAir, 2021).

초미세먼지의 발생은 배출원으로부터 발생하는 직접적인 배출과 화학물질 반응에 따른 2차 생성 기원의 간접 배출로 나눌 수 있다. 간접 배출은 전체 초미세먼지 배출량의 약 72%를 차지하고 있는 것으로 알려져 있어 관리

†Corresponding author : ecjeon@sejong.ac.kr (13496, KICCE, 316 ho Yatopleaders Bldg., 42 Jangmi-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea. Tel. +82-2-3408-4353)

ORCID 강성민 0000-0001-8628-8241
노준영 0000-0002-3066-3230

김고은 0000-0002-3070-7467
전의찬 0000-0003-2783-4550

가 필요하다(MOE, 2017).

초미세먼지 2차 생성물질로는 질소산화물, 황산화물, 휘발성유기화합물, 암모니아 등이 있다. 초미세먼지 2차 생성물질 중 NO_x와 SO_x의 경우, 주요 연구 및 관리가 잘 되어 있는 반면, NH₃는 상대적으로 미흡한 실정이다(MOE, 2016). NH₃는 대기오염물질일 뿐만 아니라, 기후변화에 영향을 미치는 단기체류성기후변화유발물질(Short-lived Climate Forcers, SLCF) 중 하나이기 때문에 관리의 중요성이 커지고 있다(KLRI, 2018; KEITI, 2020).

2018년 기준 국내 NH₃ 배출량은 315,975 ton으로, 농업 부문이 79%로 가장 큰 포션을 차지하고 있으며, 그중 92%가 분뇨관리 부문에서 배출되는 것으로 나타났다(MOE, 2020a). 분뇨관리 부문의 NH₃ 배출량 산정 시 일반 소와 돼지는 국내에서 개발된 배출계수를 사용하고 있지만, 그 외 배출원은 유럽 EEA (European Environment Agency)와 미국 EPA (Environmental Protection Agency)의 배출계수를 사용하고 있어 국내 특성을 반영한 배출계수의 개발이 필요한 실정이다(MOE, 2020b).

국내 연구의 경우, 축사의 NH₃ 배출 측정 시 주로 챔버 방법을 이용하고 있으며, 현재 대기오염물질 배출량 산정 시 적용하고 있는 소와 돼지 부문의 암모니아 배출계수의 경우에도 챔버 방법을 이용하여 개발되었다(NIER, 2006; Jairo Alexander et al., 2013; 2015; Sa, 2010). 하지만 이 방법의 경우, 개방형 축사에서 실제 환기량을 고려하기 어렵고, 암모니아 배출을 실시간으로 모니터링 할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 또한, 실제 가축이 축사 내에 있을 시, 사육환경을 고려하여 내부로 들어가 측정하여야 한다.

개방형으로 기르는 가축 환경과 관련하여 Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production (VERA) test protocol에서는 개방형 축사에서 암모니아를 측정할 수 있는 방법론과 관련 조건에 대해 제시하고 있다. VERA test protocol에서는 추적가스법을 소개하며, 개방형 축사에서 암모니아 배출계수 산정 시 사용할 수 있는 방법론으로 권장하고 있다. 개방형 축사의 경우, 축사 자체가 개방되어 있기 때문에 일반적으로 농도만을 측정하여 배출량을 산정할 수 없다. 추적가스법의 경우, 추적가스를 이론적으로 계산하거나 투입하여 내·외부 농도차이를 이용해 환기율을 구하고, 이를 이용하여 목적하는 대기오염 물질의 배출량을 산정하는 방법이다. 국내에서 추적가스법과 관련된 연구는 대부분 건물 부분의 환기량 계산시 사용하고 있는 것으로 조사되었다(International VERA Secretariat, 2018).

따라서, 본 연구에서는 VERA test protocol의 방법론을 활용하여 개방형 산란계사를 대상으로 추적가스법 적용에 따른 NH₃ 배출계수를 산정하고 선행연구의 배출계수와 비교함으로써 개방형 축사의 NH₃ 배출계수 개발 시 추적가스법의 적용 가능성을 확인해보고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구 대상시설 선정

본 연구에서는 개방형 축사에 추적가스법의 적용 가능성을 파악하기 위해 VERA test protocol에서 제시하고 있는 추적가스법의 축사의 측정 기준에 근거하여 계사를 선정하였다(International VERA Secretariat, 2018).

산란계사는 Table 1에서 보는 바와 같이 4,000마리의 규모의 사육 시설이며, 닭의 중량은 1.8 kg, 기준에 2주 이상 사용한 곳을 대상으로 하였다. 이는 VERA test protocol에서 제안하고 있는 최소 750마리 이상, 실측 전 축사의 사용 기간인 2개월을 충분히 충족하는 조건이다.

Table 1. Agronomic requirements for Laying hens

Criterion	Vera protocol	This study
	Laying hens	Laying hens
Minimum number of animals in test compartment	750	4,300
Minimal period of use of housing system before testing	2 months	more than 2 months
Permitted weight range (kg)	-	1.8

2.2. 암모니아 배출계수 산정 방법

암모니아 배출계수 산정은 Vera test protocol에서 개방형 축사에 적용하고 있는 추적가스법을 이용하였다. 추적가스법은 주변의 영향을 받지 않는 안정한 기체를 추적가스로 이용하며, 추적가스와 측정 대상물질의 내·외부 농도 차이를 통해 환기율을 고려하여 배출계수를 산정한다.

추적가스로는 안정한 기체인 CO₂와 SF₆를 주로 사용한다. CO₂는 동물의 열과 호흡 등 대사과정에서 발생하는 이론적인 배출을 함께 고려하여 환기율을 산정한다. SF₆의 경우 실제 인공적인 추적가스를 주입하여 환기율을 산정하는 방법으로 SF₆는 직접적으로 가스를 투입하여야 하기 때문에, 농장의 협조가 어려운 점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 추적가스로 CO₂를 사용하였다. 배출계수 산

정을 위한 절차는 다음과 같다.

먼저 축사의 환기율은 동물의 열과 호흡 기반 이론적 CO₂ 생성 농도를 이용한다. 따라서, 이론적인 닭의 HPU (Heat Production Unit)를 산정해야 한다. HPU는 동물의 대사과정에서 발생하는 CO₂ 배출을 고려하기 위해 산정해야 하는 개념으로 열생산량을 나타내며, 이를 이용해 열생산량 당 CO₂ 발생량을 산정할 수 있다. HPU와 환기율은 International Commission of Agricultural Engineering (CIGR)에서 제시된 계산식을 이용해 산정할 수 있다(ICAIE, 2002). CO₂ 발생량은 식 (2)에서 설명되어 있듯 HPU 당 0.185 m³/h CO₂를 발생하는 것으로 CIGR에 제시되어 있으며 이 값은 여러 실험 결과를 기반으로 제안되었다고 설명되어 있다. 다음 식의 HPU 및 환기율은 CIGR에서 축종별로 충분한 이론적인 검증은 거쳐 제시한 식을 이용하였으며, 관련 상수는 계수의 형태로만 제시되어 있다.

CIGR에 따르면, 산란계의 HPU를 산정하기 위해서는 산란계사 내 닭의 총 사육두수(N)와, 닭의 무게(m^{0.75}), 일당 계란 생산량(Y²) 자료를 사용하여야 한다. HPU의 단위는 W로 표기하게 되는데, 이는 산란계사 내 닭 1 kg 당 일간 총 열생산량으로 설명된다.

산란계의 HPU는 식 (1)을 통해 계산된다.

$$HPU = N \times 6.28 \times m^{0.75} + 25 \times Y^2 \quad (1)$$

여기에서,

- THP_L : 산란계의 총 열생산량(W)
- N : 산란계사 내 총 닭 사육 두수
- m^{0.75} : 닭의 평균 무게(kg)
- Y² : 일당 계란 생산량(kg/day)

HPU를 이용한 환기율은 식 (2)를 통해 계산된다.

$$VR = \frac{0.185C \times HPU}{(CO_{2Inside} - CO_{2outside}) \times 10^{-6}} \quad (2)$$

여기에서,

- VR : 환기율(m³/h)
- 0.185C : Convert coefficient (m³/h·HPU)
- HPU : 산란계사 내 닭 1 kg 당 일간 총 열생산량(W)
- CO_{2Inside} : 산란계사 내부의 추적가스 CO₂ 농도(ppm)
- CO_{2Outside} : 산란계사 외의 추적가스 CO₂ 농도(ppm)

암모니아 배출계수는 최종적으로 다음 식 (3)을 이용하여 산정한다. 암모니아 배출계수는 선행연구의 기준에 따라 연(Year) 기준으로 산정하였으며, 우리나라는 사육두수를 기준으로 해되는 AP (Animal Place)를 기준으로 하기 때문에 두 가지를 함께 고려하였다. AP의 경우 면적 당 허용가능 사육두수로 본 연구에서는 축산법 시행령에 제시되어 있는 산란계의 가축사육시설 단위면적당 적정 가축사육기준(0.075 m²/마리)을 이용하였다(Livestock Industry Act, 2018).

$$NH_{3EF} = VR \times \frac{(NH_{3Inside} - NH_{3outside}) \times Mw}{A \times Vm} \times 24 \times 365 \times 10^{-6} \quad (3)$$

여기에서,

- E_{NH₃} : NH₃ 배출량(kgNH₃)
- VR : 환기율(m³/h)
- NH_{3Inside} : 시설 내부의 암모니아 농도(ppm)
- NH_{3Outside} : 시설 내부의 암모니아 농도(ppm)
- M_w : NH₃의 분자량(정수) = 17.031(g/mol)
- V_m : 이상기체 1 몰의 표준 상태에서의 체적(정수) = 22.4(10⁻³ m³/mol)
- A : 산란계사 내 닭 사육 두수(마리 or AP (Animal Place))

2.3. 암모니아 및 CO₂ 농도 측정 방법

본 연구에서 적용하기로 한 추적가스법은 동물의 이론적인 HPU를 이용하여 CO₂를 활용하는 방법이기 때문에 추적가스법을 활용한 암모니아 배출량을 산정하기 위해서는 추적가스로 사용되는 CO₂와 배출량 산정의 대상인 암모니아를 측정하여야 하며, 축사 내부와 외부의 CO₂와 암모니아 농도를 함께 측정해주어야 한다. 본 연구에서는 Vera test protocol에서 개방형 축사를 대상으로 추적가스법 적용시 사용되었던 OP-TDL (GasFinder3-op, boreal Canada)방법을 이용하여 축사 내부의 NH₃ 농도(4 ~ 6,500 ppm)와 CO₂ 농도(120 ~ 60,000 ppm)를 함께 측정하였다.

OP-TDL은 송·수신부와 반사판으로 구성되어 있다. 측정 방법은 송신부에서 특정 파장의 IR (Infrared Ray)을 방출하고 일정 거리에 설치된 반사판으로부터 반사된 IR을 다시 수신부의 검출기로 검출하여 IR이 송수신된 경로 내의 거리와 파장의 흡수 정도를 고려하여 측정물질의 농도를 정량하는 방법으로 NH₃와 CO₂ 농도를 함께 측정할 수 있다.

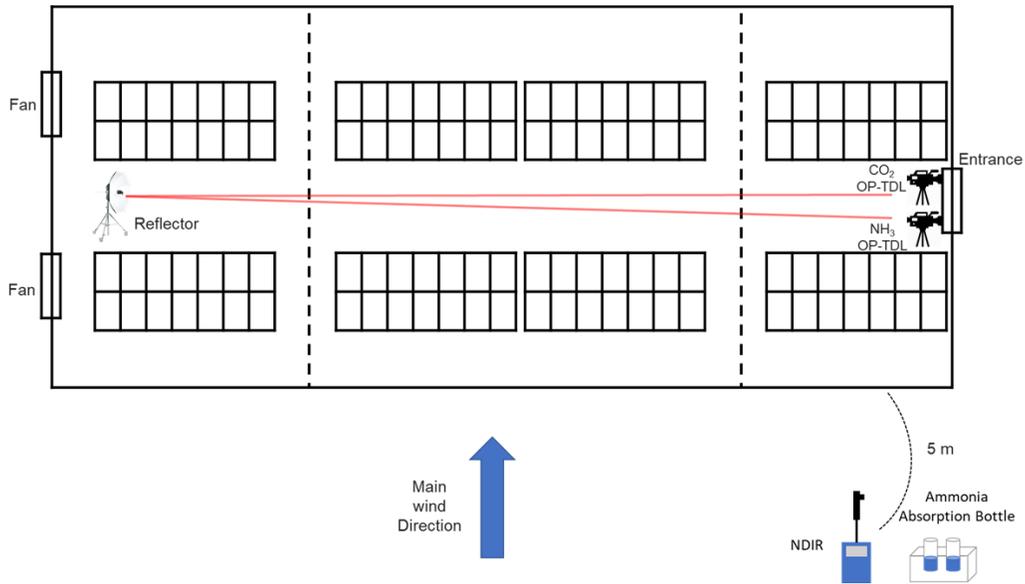


Fig. 1. Schematic of NH₃ and CO₂ measurement positions at open Laying hens house

암모니아 농도는 주풍향 방향을 함께 고려하였으며, 계사 내부의 전체 농도를 대표할 수 있도록 계사 중앙부 양 끝에 송·수신기와 반사판을 설치하였다.

외부 농도는 Vera teat protocol에서 내부 영향을 줄일 수 있는 거리로 권고하는 5 m 이상되는 지점에서 측정하였다. 외부 CO₂ 농도 측정은 비분산적외선법(NDIR, TSI7525, USA)을 이용하였으며, 외부 NH₃ 농도 측정은 인도폐놀법을 이용하였다. 암모니아 시료채취는 2개의 50 ml 용량플라스크에 암모니아 흡수액(붕산용액 총 50 mL로 흡수)을 넣고 미니펌프(SIBATA MP-ΣNII, Japan)를 이용하여 4 L/min으로 약 19분간 총 50 L의 배기가스를 흡입하였다(NIER, 2021). 암모니아를 포집한 흡수액은 640 nm 파장에서 흡광도를 측정하였으며 측정 기계는 분광광도계(Shimadzu 17A, Japan)를 이용하였다.

3. 연구결과

3.1. 암모니아 농도 및 CO₂ 농도 측정 결과

암모니아 배출계수 산정을 위한 암모니아 농도 및 CO₂ 농도를 측정하기 위해 현장을 총 3회 방문하였으며, 총 42 개의 자료를 확보할 수 있었다.

암모니아 농도 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 암모니아 농도 측정 결과, 개방형 산란계사 내부는 최대 9.59 ppm에서 최소 3.22 ppm 범위로 나타났으며, 평균 5.60 ppm, 표준

편차 1.59 ppm으로 측정되었다. 암모니아 외부 농도는 최대 0.49 ppm에서 최소 0.24 ppm 범위로 나타났으며, 평균 0.46 ppm, 표준편차 0.06 ppm으로 측정되었다. 암모니아 외부 농도는 도시의 대기 중 암모니아 농도 범위 0.001 ~ 0.02 ppm 보다 다소 높게 나타났는데, 이는 측사에서 5 m 떨어진 곳이어서 측사의 영향을 받을 수 있기 때문인 것으로 판단된다(Park et al., 2020). 측사 주변 부지경계의 악취배출허용 기준은 1 ppm 미만이기 때문에 충분히 도시의 대기 중 암모니아 농도 범위보다 높을 수 있다고 판단된다(Malodor Prevention ACT, 2011).

Table 2. Ammonia concentration at open Laying hens house

Classification	NH ₃		n
	In	Out	
1st	5.49	0.47	14
2nd	5.53	0.41	14
3rd	5.77	0.49	14
Mean	5.60	0.46	42
Minimum	3.22	0.24	42
Maximum	9.59	0.49	42
Standard deviation	1.59	0.06	42

CO₂ 농도 측정 결과를 Table 3에 나타내었다. CO₂ 농도 측정 결과, 개방형 산란계사 내부는 최대 967.47 ppm에서 최소 534.60 ppm 범위로 나타났으며, 평균 746.10 ppm, 표준편차

100.56 ppm으로 측정되었다. 외부농도는 최대 471.65 ppm에서 최소 438.25 ppm 범위로 나타났으며, 평균 457.66 ppm, 표준편차 10.31 ppm으로 측정되었다. CO₂ 외부 농도는 도심의 대기 중 농도 범위 424.11 ppm ~ 449.76 ppm 보다 다소 높게 나타났다(Park et al., 2021). CO₂ 농도 또한 NH₃와 유사하게 축사에서 5 m 떨어져 있는 지역이기 때문에 축사에 대한 영향을 받을 수 있을 것이라고 판단된다.

Table 3. CO₂ concentration at open Laying hens house

Classification	CO ₂ (ppm)		n
	In	Out	
1st	750.14	457.86	14
2nd	683.38	458.65	14
3rd	804.78	456.47	14
Mean	746.10	457.66	42
Minimum	534.60	438.25	42
Maximum	967.47	471.65	42
Standard deviation	100.56	10.31	42

3.2. 개방형 계사의 암모니아 배출계수 산정 결과

개방형 산란계사를 대상으로 추적가스법을 이용하여 암모니아 배출계수를 산정한 결과를 Table 4에 나타내었다. 배출계수 산정결과, 두수 기준은 0.36 kgNH₃/year/head, AP 기준은 0.39 kgNH₃/year/AP로 나타나 AP 기준의 배출계수가 더 높은 것으로 분석되었다. 이러한 차이는, 우리나라의 경우 적정 사육두수보다 다소 많은 가축을 기르고 있기 때문에, 실제 사육두수 기준으로 하였을 때의 배출계수가 더 높은 것으로 분석되었다.

선행연구와의 암모니아 배출계수 비교 결과, 두수기준으로 비교할 때, 현재 CAPSS에서 적용하고 있는 산란계 닭의 배출계수 0.37 kgNH₃/year/head와는 약 3% 낮게, AP기준으로 비교할 때, 덴마크, 네덜란드, 유럽과는 약 22% 높게 나타났다. 하지만 이러한 수치는 EMEP/EEA (2019)에서 제시하고 있는 분뇨 분야의 배출계수 95% 신뢰구간의 상한과 하한 범위인 ±25%보다 낮기 때문에, 해외 배출계수와도 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. NH₃ emission factor at open Laying hens house

This study		MOE (2020)	Vera test protocol (2018)		EMEP/EEA (2019)
kgNH ₃ /year/head	kgNH ₃ /year/AP	kgNH ₃ /year/head	Denmark	Netherlands	kgNH ₃ /year/AP
0.36	0.39	0.37	kgNH ₃ /year/AP	kgNH ₃ /year/AP	kgNH ₃ /year/AP
			0.32	0.32	0.32

4. 결론

본 연구에서는 개방형 축사에서 NH₃ 배출계수 산정 시, 추적가스법의 적용 가능성을 확인하기 위하여 추적가스법을 이용하여 개방형 산란계사의 NH₃ 배출계수를 산정하였다. 개방형 축사에서의 NH₃ 배출계수 개발 방법은 유럽의 Vera test protocol에 제시되어 있으며, 유럽의 여러 나라에서도 이 방법을 이용하여 배출계수를 개발하고 있다. Vera test protocol에는 개방형 축사에 NH₃ 배출계수를 개발할 수 있는 방법으로 추적가스법을 소개하고 있으며, 이 방법을 적용할 시 최소 측정 조건들을 제시하고 있다.

본 연구에서도 추적가스법을 이용한 NH₃ 배출계수를 산정하기 위해 Vera test protocol의 측정 조건을 만족하는 개방형 산란계사를 대상으로 하였다. 측정 방법 또한 Vera test protocol에서 사용하고 있는 OP-TDL 장치를 사용하여 축사 내부의 CO₂와 NH₃ 농도를 측정하였으며, 외부 CO₂ 농도와 NH₃ 농도 측정은 각각 NDIR방식과 인도 페놀법을 이용하였다.

NH₃ 농도 측정 결과, 개방형 산란계사 내부는 평균 5.60 ppm, NH₃ 외부 농도는 평균 0.46 ppm으로 측정되어 일반 도시의 대기 중 NH₃ 농도범위보다 다소 높게 측정되었다. CO₂ 농도 측정 결과, 개방형 산란계사 내부는 평균 746.10 ppm, 외부농도는 평균 457.66 ppm으로 측정되어 CO₂ 외부 농도 또한 도심의 대기 중 농도 범위보다 다소 높게 나타났다. 외부의 NH₃와 CO₂ 농도가 다소 높게 나타난 것은 축사에서 5 m 떨어진 곳이기 때문에 축사의 영향을 받을 수 있을 것이라고 판단된다.

NH₃ 배출계수 산정결과, 두수 기준은 0.36 kgNH₃/year/head, AP 기준은 0.39 kgNH₃/year/AP로 나타나 선행연구보다 두수기준으로는 약 3% 낮게, AP기준으로 비교할 때, 덴마크, 네덜란드, 유럽보다는 약 22% 높게 나타났지만, 해외의 분뇨처리 분야의 배출계수의 95% 신뢰구간의 상한과 하한의 범위 이내로 나타나 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 개방형 축사에서 NH₃ 배출계수 산정 시 추적가스법을 이용하는 것은 유의미한 결과를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 기존에 축사에서 주

로 사용한 챔버 방법 이외의 방법으로도 NH₃ 배출계수를 개발할 수 있음을 확인하였으며, 축사의 특성 및 운영환경을 고려하여 상황에 맞게 NH₃ 배출계수를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

하지만, 본 연구에서는 개방형 산란계사 한 곳만을 대상으로 3회 측정하여 배출계수를 비교하였기 때문에 향후 더 많은 곳을 대상으로 이 방법을 적용하여 검증해 볼 필요가 있으며, 다른 가축을 대상으로도 연구를 진행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.

References

- EMEP/EEA. 2019. Air pollutant emission inventory guidebook.
- Enforcement Decree Of Livestock Industry Act, Article 15, paragraph 1. subparagraph (the attached) Table 1. B Item. 2018.09.01.
- Enforcement Rule Of the MALODOR PREVENTION ACT, Article 15, paragraph 1. subparagraph (the attached) Table 3, 2011.02.01
- International Commision of Agricultural Engineering. 2002. 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Heat and moisture production at animal and house levels, 5-46.
- International VERA Secretariat. 2018. VERA TEST PROCOTOL for Livestock Housing and Management Systems Veersion 3: 2018-09. Netherlands: Vlinderweg.
- IQAir. 2021. 2020 World Air Quality Report.
- Jairo Alexander OS, Ilda De Fatima FT, Richard S. G, Keller Sullivan OR, Enrique Miguel CC, Fernanda CS. 2013. Adaptation and validation of a methodology for determining ammonia flux generated by litter in naturally ventilated poultry houses. DYNA 81(187): 137-143.
- Jairo Alexander OS, Ilda De Fatima FT, Richard S. G, Keller Sullivan OR, Olga Lucia ZM. 2015. A simple methodology to measure ammonia flux generated in naturally ventilated poultry houses. Rev Colomb Cienc Pecu 28: 3-12.
- KLRI. 2018. Integrated management of air pollutants and greenhouse gases.
- KEITI. 2020. A plan to improve the reliability of domestic greenhouse gas inventory according to the new climate system.
- Ministry of Environment. 2016. Fine Dust, What is It?. Korea: Sejong.
- Ministry of Environment. 2017. Management Strategies to Reduce PM-2.5 Emission. Korea: Sejong.
- Ministry of Environment National Fine Dust Infromation Center. 2020a. 2018 Air Pollutant Emissions. Korea: Chungbuk.
- Ministry of Environment National Fine Dust Infromation Center. 2020b. National Air Pollutant Emission. Calculation Method Handbook (IV). Korea: Chungbuk
- National Institute of Environmental Research. 2006. Estimation of Ammonia Emission Factor in Atmosphere and Establishment of Inventory.
- National Institute of Environmental Research. 2021. Standard Methods for the Measurements of Air Pollution: Incheon.
- Park CE, Jeong SJ, Shin YS, Cha YS, Lee, HC. 2021. Reduction in urban atmospheric CO₂ enhancement in Seoul, South Korea, resulting from social distancing policies during the COVID-19 pandemic. Atmospheric Pollution Research 12: 101176.
- Park JS, Ryoo JY, Jee JB, Song MJ. 2020. Origins and Distributions of Atmospheric Ammonia in Jeonju during 2019~2020. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 36(2): 262-274.
- Sa JH. 2010. Ammonia Flux from Cow Manure in Relation to the Envirionmental Factors in Livestock Facilities. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 26: 432-442.