Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2021;40(3):149-160. Korean
Published online 2021 August 31. https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.3.18

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

시설잎들깨 재배의 퇴비 시용에 의한 암모니아 배출량

홍성창*, 김진호, 김민욱

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과

Estimation of Ammonia Emission with Compost Application in Plastic House for Leafy Perilla Cultivation

Sung-Chang Hong*, Jin-Ho Kim and Min-Wook Kim (Climate Change & Evaluation Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 19 May 2021/ Revised: 27 July 2021/ Accepted: 24 August 2021

Copyright ⓒ 2021 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Sung-Chang Hong
https://orcid.org/0000-0002-9042-1284

Jin-Ho Kim
https://orcid.org/0000-0002-5266-1586

Min-Wook Kim
https://orcid.org/0000-0001-8262-5909

Abstract

BACKGROUND: Concerns have been raised about the impact of recent high concentrations of fine dust on human health. Ammonia(NH_3) reacts with sulfur oxides and nitrogen compounds in the atmosphere to form ultrafine ammonium sulfate and ammonium nitrate (PM2.5). There is a growing need for accurate estimates of the amount of ammonia emitted during agricultural production. Therefore, in this study, ammonia emissions generated from the cultivation of leafy perilla in plastic houses were determined.

METHODS AND RESULTS: Cow manure compost, swine manure compost, and poultry manure compost each at 34.6 ton ha^{-1}, the amount commonly used by farmers in the field, was sprayed on the soil surface. Just after spraying cow manure compost, swine manure compost, and poultry manure compost, the ammonia was periodically measured and analyzed to be 22.5 kg ha^{-1}, 22.8 kg ha^{-1}, and 85.2 kg ha^{-1}, respectively. The emission factors were estimated at 70.0 kg-NH_3 ton-N, 62.8 kg-NH_3 ton-N, and 234.1 kg-NH_3 ton-N, respectively. Most ammonia was released in the two weeks after application of the compost and then the amount released gradually decreased.

CONCLUSION: Therefore, it is necessary to improve the emission factor through a study on the estimation of ammonia emission by type of livestock manure and major farming types such as rice fields and uplands, and to update data on the production, distribution, and sales of livestock manure.

Key words: Ammonia, Emission Factor, Manure Compost, Particulate Matter, Plastic House

*Corresponding author: Sung-Chang Hong
Phone: +82-63-238-2501; Fax: +82-63-238-3825;
E-mail: schongcb@naver.com

서 론

최근 급격하게 미세먼지 농도가 증가함에 따라 국내 주요 산업에서 발생하는 대기오염물질과 더불어 농업에서 발생하는 암모니아 휘산에 대한 연구도 중요하게 되었다. 암모니아는 반응성이 큰 염기성 기체로 다양한 대기오염의 원인물질로 작용할 수 있으며 환경부에서 관리하는 8개 대기오염물질 중 하나

이다. 미세먼지는 아주 작은 크기의 인체에 유해한 입자상 오염물질로 크기에 따라 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)로 구분한다. 2차 생성 미세먼지란 공장 굴뚝이나 자동차에서 배출된 질소산화물, 황산화물 등이 공기 중에 있는 물질과 반응하여 생성된 지름 2.5 μm 이하의 초미세먼지(PM2.5)를 말한다. 우리나라 초미세먼지의 70% 이상이 2차 생성 미세먼지로 밝혀진 바 있다(환경부 미세먼지 관리종합대책, 2017).

대기 중에서 황산화물, 질소산화물 등은 암모니아와 반응하여 황산암모늄, 질산암모늄 등의 초미세먼지를 생성한다[1,2,3]. 초미세먼지의 발생은 근본적으로 암모니아의 배출에 영향을 받으며 암모니아 배출은 초미세먼지 수준의 시공간적 변이에 황산화물과 질소산화물 보다 더 강하게 관련된다[4-6]. 농업 시스템에서 질소 이용효율을 향상시키는 것은 대기질 개선에 도움이 되며 암모니아는 효율적인 미세먼지 저감을 위해 황산화물과 질소산화물 만큼 배출량을 관리해야 할 필요성이 있다고 한다[7], 또 PM2.5 발생을 감소시키기 위해서는 농업에서 나오는 암모니아 줄일 필요가 있다고 한다[8,9]. 2017년 국내 암모니아의 배출량은 308,298톤 이었고 이 중 79.2%인 244,335톤이 농업부문에서 배출되었다(환경부, 국가대기오염물질 배출량 서비스, 2020). 농업분야의 암모니아는 축산분뇨 저장, 액비 저장, 축분과 액비의 살포과정 중에 많은 양이 발생하고 축사, 방목 과정과 농경지의 질소질 비료 시용 과정에서 배출된다[10]. 우리나라에서 가축분뇨의 발생량 중 72% 가 퇴비(119,090 Mg day^{-1})와 액비(8,017 Mg day^{-1})로 농경지로 투입된다(환경부, 가축분뇨 처리통계, 2017). 암모니아 배출의 지속적인 관리를 위해서는 누락 배출원 발굴과 배출량추정 방법 개선, 국내 실정에 맞는 지역별 배출계수 개발을 확대할 필요가 있다[11].

최근 가축분퇴비는 각 지역의 가축분퇴비화 공장에서 부숙화 과정을 통해 가공되고 포대단위로 포장 및 유통되어 농경지 작물재배의 질소공급원으로 공급되고 있다. 가축분퇴비는 원재료를 배출하는 가축의 종류에 따라 우분퇴비, 돈분퇴비, 계분퇴비로 구분되는데 퇴비로 칭하기도 한다. 이들 가축분퇴비는 대부분이 단일한 조성분으로 이루어져 있지 않고 생산공장이 소재한 지역의 가축분 원료 수급 사정 등에 따라 성분의 배합비율이 다르고 다양한 재료와 혼합되어 생산된다.

시설재배 잎들깨는 재배기간이 8~10 개월인 엽채류 작물로 비닐하우스에서 재배하는 잎들깨는 재식거리가 균일하고 직립형으로 윈드터널 챔버를 이용한 암모니아 포집시 작물 전체를 챔버내부에 위치시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 시설재배작물 중 파종후 재배기간이 길고 질소질 양분공급자재의 투여가 많아 시설재배지의 암모니아 배출량 산정의 대상작물로 이용하였다. 농림축산식품부의 농업경영체 등록정보 조회서비스에 의하면 2020년도 전국의 잎들깨 재배면적은 1,154 ha였다. 잎들깨의 표준 질소비시량은 노지재배 200 kg ha^{-1}, 시설재배는 64 kg ha^{-1}이다.

따라서, 본 연구는 시설재배작물 중 잎들깨 생산을 위해 시용되는 가축분퇴비에서 발생하는 암모니아의 배출량을 산정하고 배출계수를 개발하기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

시험포장의 토양특성

본 연구는 2019년 6월부터 2021년 2월 까지 충남 금산군 남일면의 현지 시험포장에서 수행하였다. 시험 전 토양의 이화학성분 분석을 위해 토양의 pH와 EC는 각각 pH meter (Model 720A, Orion)와 EC meter (Model 145A, Orion)를 사용하여 측정하였다(NIAST, 2000). 토양 중 유기물은 습식산화분해법인 Tyurin법(농진청, 2010), 유효인산은 Lancaster 법 (농진청, 2010)으로 분석하였으며 치환성 양이온은 1N NH_4OAc용액(pH 7)으로 침출하여 ICP-OES (GBC Integra XMP, Australia)를 이용하여 분석하였다(NIAST, 2000). 시험전 토양의 이화학 성분은 유효인산이 1,437 mg kg^{-1}으로 유효인산이 적정 함량범위인 250~350 mg kg^{-1}을 초과하였고 pH 는 5.6으로 적정 범위인 6.0~6.5 보다 다소 낮은 특성을 나타내었다. 시험전 토양의 이화학적 성분은 연차 간에 다소 간의 차이를 나타냈다(Table 1).

가축분 퇴비의 이화학적 특성

본 연구에서 사용한 퇴비의 조성은 Fig. 1과 같으며 퇴비의 이화학적 성분함량은 Table 2와 같다. 2019년과 2020년 동일한 제조사로 부터 구입한 우분퇴비(A사), 돈분퇴비(B사), 계분퇴비(C사)는 각각 주요성분인 우분, 돈분, 계분 외에 다양한 분뇨와 톱밥 등을 포함하고 있다(Fig. 1). 따라서 이화학적 성분함량의 차이도 커서 T-N 이 1.67 % 에서 3.28 % 까지 함유되었다. 2년간 연구의 재료로 사용된 계분퇴비의 T-N 함량도 동일한 제조사에서 2019년도에 구입한 것은 1.05 %, 2020년 구입한 것은 2.13% 로 차이가 컸다.

시설잎들깨 재배

시설잎들깨 재배를 위해 2019년 6월 20일에 앞 작기에 재배했던 잎들깨 잔사와 토양표면을 경운 및 정지작업 하였다.

Table 1. Chemical property of soil used in this study

Year	pH (1:5)	EC (dS/m^{-1})	OM (g kg^{-1})	Available P_2O_5 (mg kg^{-1})	mg kg^{-1}		Ex. Cations (cmol kg^{-1})			
					NO_3-N	NH_4-N	Ca	K	Na	Mg
2019	5.6	0.69	32.4	1,437	37.7	7.1	5.2	1.7	0.5	1.9
2020	5.6	0.26	50.1	880	18.2	12.4	8.2	0.3	0.1	1.0

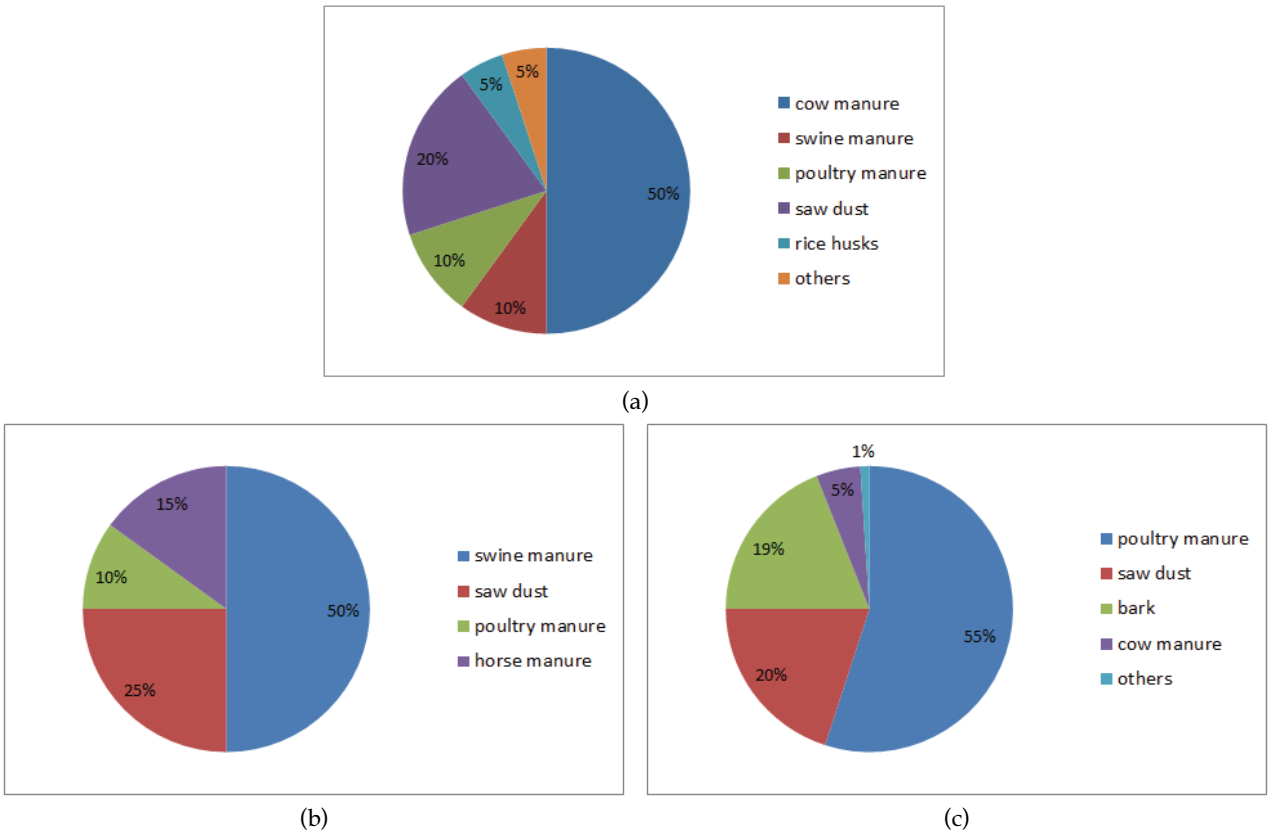


Fig. 1. Material components of manure composts used in this study (a) CMC: Cow Manure Compost, (b) SMC: Swine Manure Compost, (c) POMC: Poultry Manure Compost.

Table 2. Chemical property of manure compost used in this study

Year	Compost	pH (1:10)	EC (dS/m^{-1})	OM (%)	C/N	water (%)	T-N	T-P	NH_4-N	NO_3-N
							(%)			
2019	POMC	7.1	4.45	31.4	19	49	1.56	1.57	0.15	0.022
	CMC	7.8	7.54	42.6	12	43	3.28	1.61	1.37	0.003
2020	SMC	8.6	2.13	36.0	21	43	1.67	4.30	0.20	0.013
	POMC	8.3	3.20	40.5	19	37	2.13	1.42	0.47	0.001

CMC: Cow Manure Compost, SMC: Swine Manure Compost, POMC: Poultry Manure Compost

2019년에 잎들깨 재배의 기비는 전량 계분퇴비로 시용하였다. 계분퇴비는 20 kg 포대단위로 유통되는 계분퇴비를 7월 12일 토양표면에 살포하였다. 계분퇴비의 시용량은 충남 금산군 일대의 잎들깨 재배 농업인이 관행적으로 사용 중인 투여량인 34.4 Mg ha^{-1}을 시용하였고 질소투여량은 369.3 kg ha^{-1}였다.

2020년에 질소(N) 투여량은 2019년과 동일한 양인 369.3kg ha^{-1}을 시용하였다. 질소 369.3 kg ha^{-1}을 투여하기 위하여 퇴비의 T-N 함량과 질소투여량으로 부터 환산하여 우분퇴비는 11.0 Mg ha^{-1}, 돈분퇴비는 21.7 Mg ha^{-1}, 계분퇴비는 17.0 Mg ha^{-1}을 각각 시용하였고 대조구로 퇴비 무처리구를 두었다(Table 3).

계분퇴비 살포 직후 트렉터 부착 로터리를 이용하여 토양표면의 계분퇴비와 토양을 교반한 후 비닐하우스 상부에 부착된 스프링클러를 이용하여 농업용 관정수를 토양표면에 충분히 살수하였다. 로터리를 이용한 퇴비와 토양표면의 교반작업은 1주일 간격으로 3회 실시하였다. 암모니아 포집은 퇴비 살포 직후 부터 로터리 작업 기간 중 주로 이루어 졌다.

잎들깨 재배의 추비는 비닐하우스 상단에 설치한 분무장치를 이용한 수분공급시 공급하는 물에 요소비료를 함유한 복합비료를 녹여 시용하였다. 생육기간 중 잎들깨의 생육상태와 잎들깨 수확 등을 고려하여 질소 83 kg ha^{-1}를 5회 분시 처리하였다.

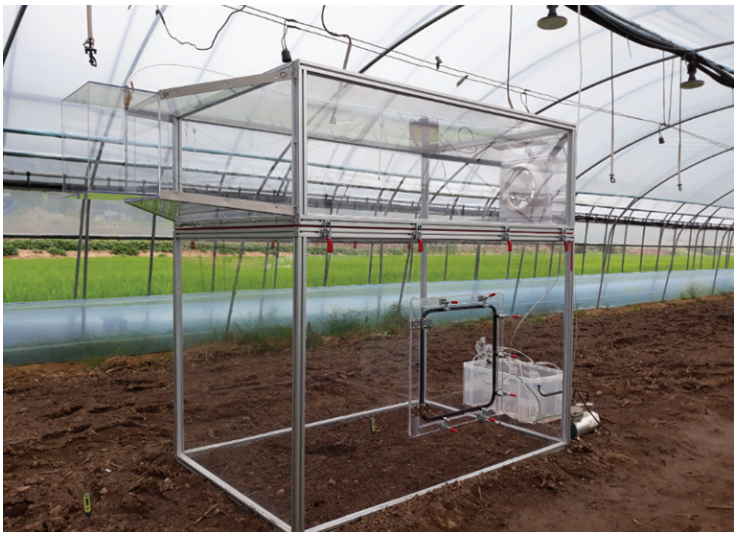
암모니아 포집 및 배출량 산정

계분퇴비가 처리된 직후 부터 윈드터널챔버(Wind tunnel

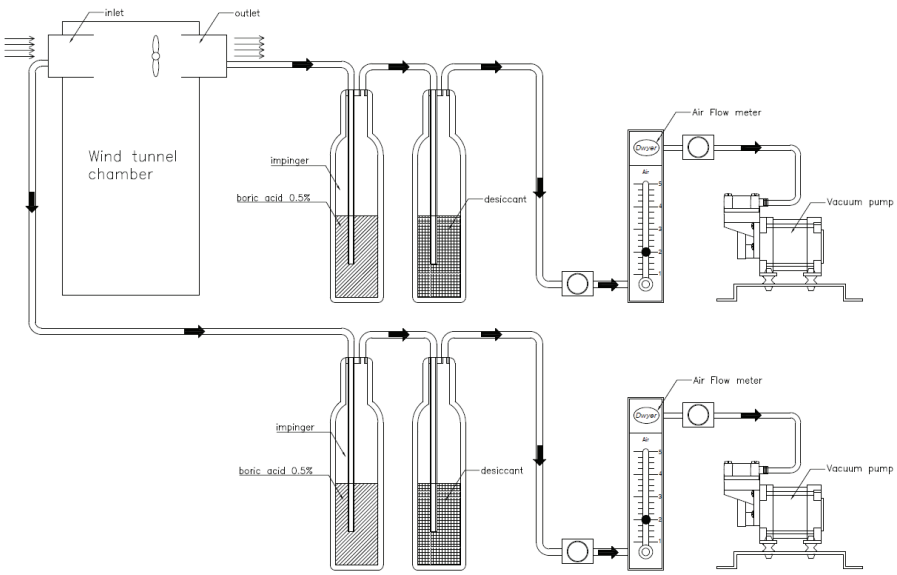
Table 3. Amount of compost and nitrogen content used in this study from 2019 to 2020

Year	Compost	Amount of application (Mg ha^{-1})	Nitrogen content (kg ha^{-1})
2019	POMC	34.4	369.3
2020	Control	-	-
	CMC	11.0	369.3
	SMC	21.7	
	POMC	17.0	

Control: no manure compost, CMC: Cow manure compost, SMC: Swine manure compost, POMC: Poultry manure compost



(a)



(b)

Fig. 2. Wind tunnel chamber modified from Jeon(2008), wind tunnel chamber installed at the actual research site(a). diagram of acid trapping method using wind tunnel chamber(b).

chamber)를 이용하여 토양표면으로 부터 배출되는 암모니아를 포집하였다. 윈드터널 챔버(Fig. 2)는 가로 150 cm, 세로 100 cm, 높이 150 cm로 아크릴 소재로 제작하였다(전의찬 등, 대기중 암모니아 배출량 산정 및 인벤토리 구축(Ⅱ), 환경

부 연구보고서, 2008). 암모니아 배출량은 [12], [13]과 환경부 연구보고서(전의찬 등, 대기중 암모니아 배출량 산정 및 인벤토리 구축(Ⅱ), 환경부 연구보고서, 2008)를 참고 및 보완하여 다음의 계산식으로 산출하였다. 윈드터널챔버의 송풍기는 지름 20 cm로 220 V 사용시 풍속이 4.72 m/sec, 공기량은 8.9 m^3/min 이나 소형 전압조절기로 110 V로 조절하여 풍속은 2.36 m/sec, 공기량은 4.45 m^3/min로 가동하였다.

윈드터널챔버의 공기량(Q)은 아래의 계산식으로 산출하였다.

$$Q\ (m^3/min) = A \times V = ¼ \times \pi D^2 \times V$$

A = cross sectional area (m^2)
V = wind velocity (m/sec)
D = fan diameter (m)

암모니아는 산성용액 포획법으로 채취하였다. 윈드터널챔버의 공기 유입구와 유출구에 진공펌프가 연결된 우레탄 튜브를 이용하여 2 liter/min의 공기 시료를 200 ml의 0.5 % boric acid가 채워진 임핀저에 1일 24시간 동안 중단 없이 포집하였다. 윈드터널챔버는 계분퇴비를 살포한 후 3반복으로 3기를 설치하여 암모니아를 포집하였다. 계분퇴비 시용 후 토양표면으로 부터 배출되는 암모니아를 2019 7월 12일 부터 7월 26일 까지는 매일 1회씩 시료를 채취하여 8월 11일 까지 31회 포집하였고 2020년에는 7월 23일 부터 8월 9일까지 포집하였다.

산성용액에 포집한 암모니아는 환경부 대기오염 공정시험법인 indophenol 측정법으로 분석하였다. 임핀저(흡수병)에 포집한 시료에 증류수를 추가하여 250 ml로 맞춘 후 시료용액으로 하였다. 분석용 시료용액 10 ml에 페놀-니트로프루시드나트륨 용액과 차아염소산 나트륨 용액을 각각 5 ml 씩 넣고 25 ~ 30℃에서 1시간 반응 후 비색계(biochrom, libra S-70)로 640 nm 파장에서 흡광도를 측정하여 정량하였다.

$$NH_3\ Emission\ (kg\ ha^{-1}) = \Sigma(C \times Q \times area\ ) \times CF$$

C (ammonium concentration)
= outlet concentration - inlet concentration
Q: Q1/Q2
Q1 (air volume): 4.45 m^3/min
Q2 (sampling air volume): 2 liter/min
CF (conversion factor): 0.944 (M.W NH_3 / M.W NH_4)

시설재배지의 기상환경특성은 2019년 8 월부터 소형기상자동관측기(AWS, STA)를 설치하여 연속적으로 측정하였다.

가스성분 분석

계분퇴비를 시험포장에 살포한 직후 진공상태로 조성한 가스시료 채취통(Canister)을 이용하여 매일 1회씩 5회 포집하여 분석 시료로 사용하였다. 가스성분의 정성 및 정량 분석은 화학적 이온화를 통하여 휘발성 유기화합물(VOC) 및 가스성분을 ppt 수준까지 정량화할 수 있는 SIFT-MS(Selected Ion Flow Tube Mass spectrometry; Syft사, VOICE 200 ultra)를 이용하였다. 분석기는 VOICE 200 Ultra AVI(Auto Validation Inlet) 분석기를 이용하였고, Labsyft 프로그램을 이용해 데이터를 분석하였다. 가스시료 채취통을 분석기에 30 cm의 라인으로 연결하여 측정하였다. 분석기로 진공을 생성한 후 Canister valve 를 열고, 120℃의 inlet temperature에서 25~30 ml/min으로 시료를 주입하여 분석하였다.

데이터 통계처리

측정자료는 통계패키지 R을 이용하여 처리간 최소유의차 검정(Least Significant Differences Test)을 수행한 후 표준편차(standard deviation)를 표기하였다.

결과 및 고찰

시설재배지의 기상환경 특성

2020년 7월 부터 8월의 비닐하우스의 기상환경 특성을 나타낸 것은 Fig. 3과 같다. 비닐하우스의 기온은 20℃ 부터 24℃ 까지, 지온은 18℃부터 22℃까지 분포를 보여 노지보다 높았다. 기온과 지온은 2020년 6월 12일부터 8월 20일까지 지속적으로 상승하였다. 습도는 비닐하우스 내부가 노지보다 낮았다. 이것은 7~8월의 장마기간 중 내린 비로 노지의 습도가 높았던 영향으로 보인다. 2019년 금산지역의 강우는 785 mm였고 2020년의 강우량은 1,619 mm로 2020년 특히 많았다. 측정기간인 7월부터 8월까지는 전년에 파종하여 5월 말까지 잎들깨 재배를 마친 후의 휴작기로 다음 작기를 준비하는 기간으로 비닐하우스의 양 측면의 비닐을 개방해 두어 환기가 원활하게 이루어지는 상태였다.

계분퇴비의 암모니아 배출량

비닐하우스 내부에서 퇴비를 살포, 시료채취, 암모니아 포집 챔버 설치, 경운 및 쟁기작업, 암모니아 포집 챔버 재설치 과정을 나타낸 것은 Fig. 4와 같다.

계분퇴비 시용 후 토양표면으로 부터 배출되는 암모니아의 발생량을 나타낸 것은 Fig. 5와 같다. 암모니아는 계분퇴비 살포 직후 부터 배출되기 시작하여 2019년 7월 12일 부터 7월 24일까지 13일 동안 대부분 배출되었다.

Yun 등[12]은 밭토양에서 총질소 함량이 1.2% 인 돈분퇴비를 20 ton ha^{-1}로 시용시 퇴비를 경운 없이 표층 살포한 처리 13일간 총 암모니아 휘산량은 28.7 kg N ha^{-1}라 했다. 이는 퇴비 중 총질소의 7.7%, NH_4-N의 42%에 해당되는 양이라 했다. 또 토양표면에 퇴비 시용시 24시간 이내 휘산된 암모니아 양은 13일 동안 휘산된 양의 약 61% 에 달한다고 하였다. Missellbrook 등[14]은 가축분의 토양 표층 살포 후 몇시간 내에 전체 암모니아 휘산량의 약 50% 가 휘산되며 이 기간의 단위 시간당 휘산량이 전체 휘산량 증감에 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. Atia[15]는 농경지에 시용된 퇴비에 의한 암모니아 휘산은 시용 후 24시간 내에 상당량이 이루어

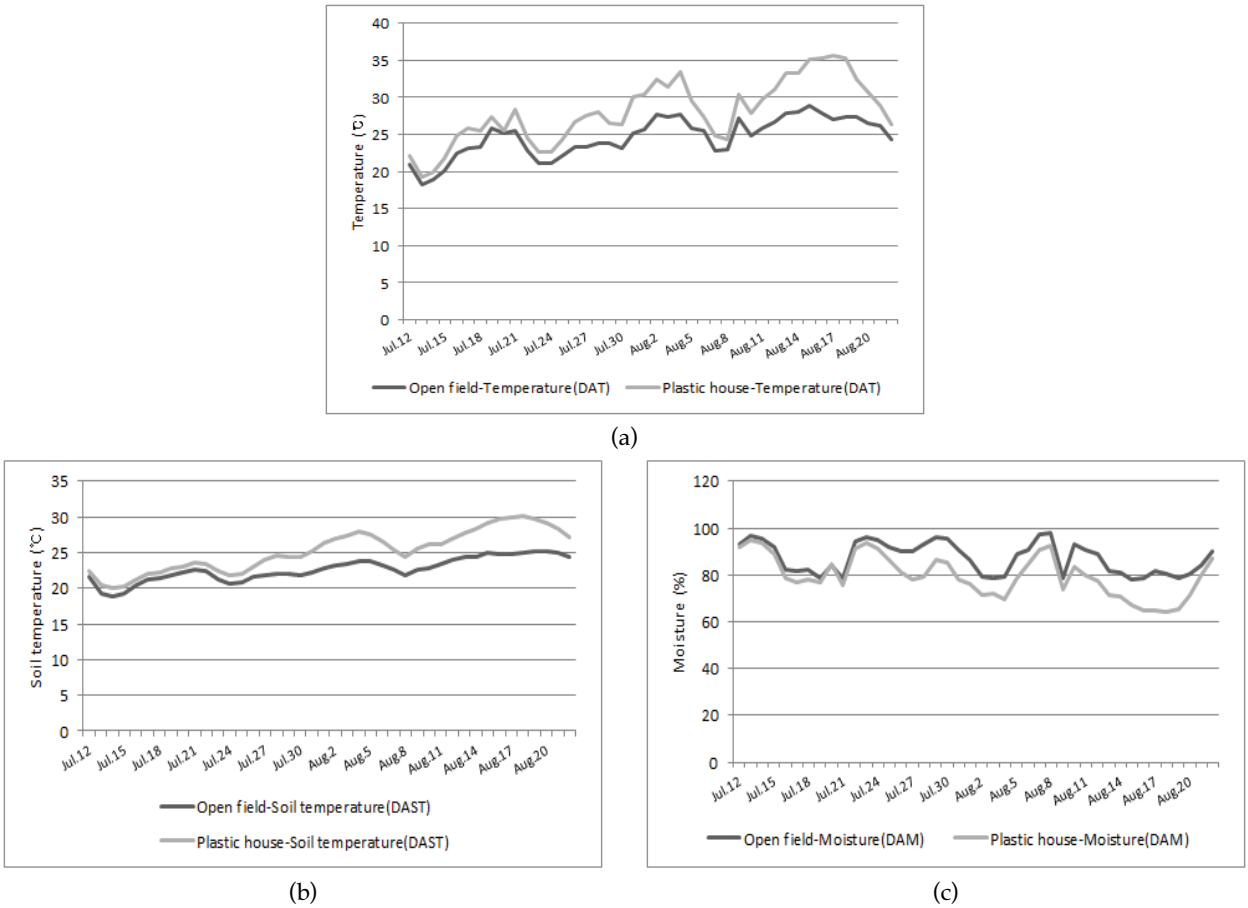


Fig. 3. Air temperature(a), soil temperature(b), and moisture(c) of plastic-house and open field. DAT: Daily Average Temperature, DAST: Daily Average Soil Temperature, DAM: Daily Average Moisture.

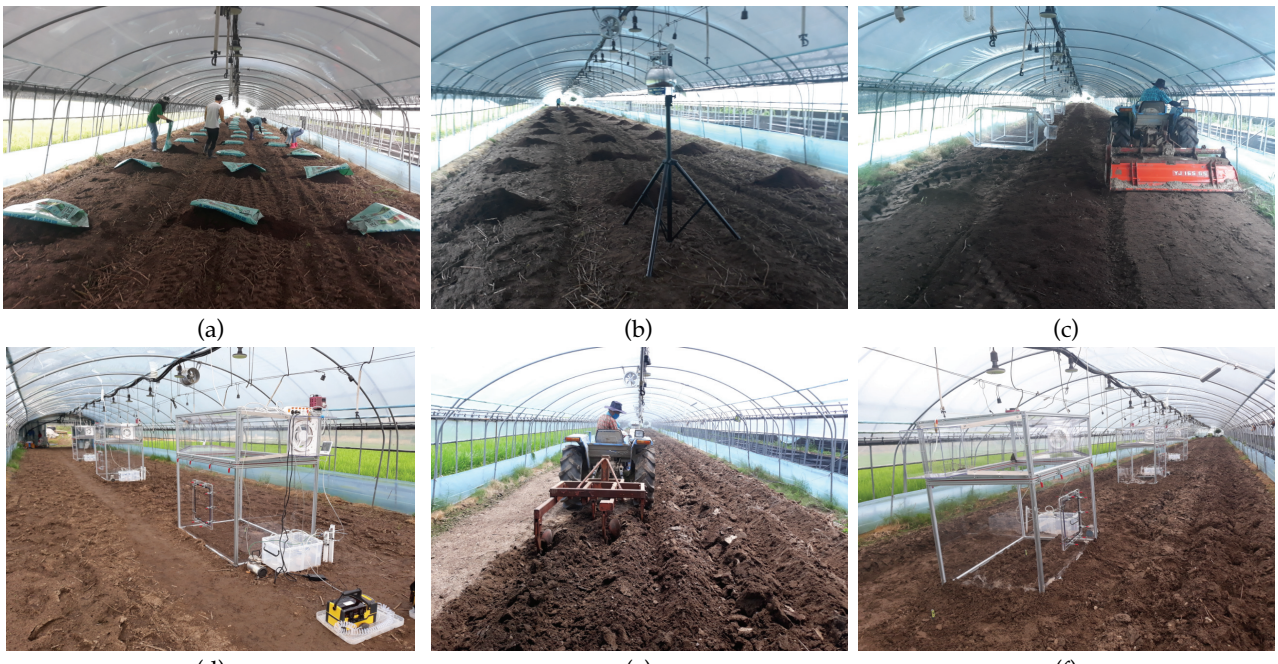


Fig. 4. Composting and ammonia capture using wind tunnel chamber in plastic house. Composting(a), sampling for analysis(b), rotary work(c), wind tunnel chamber installation(d), plowing(e), and wind tunnel chamber reinstall(f).

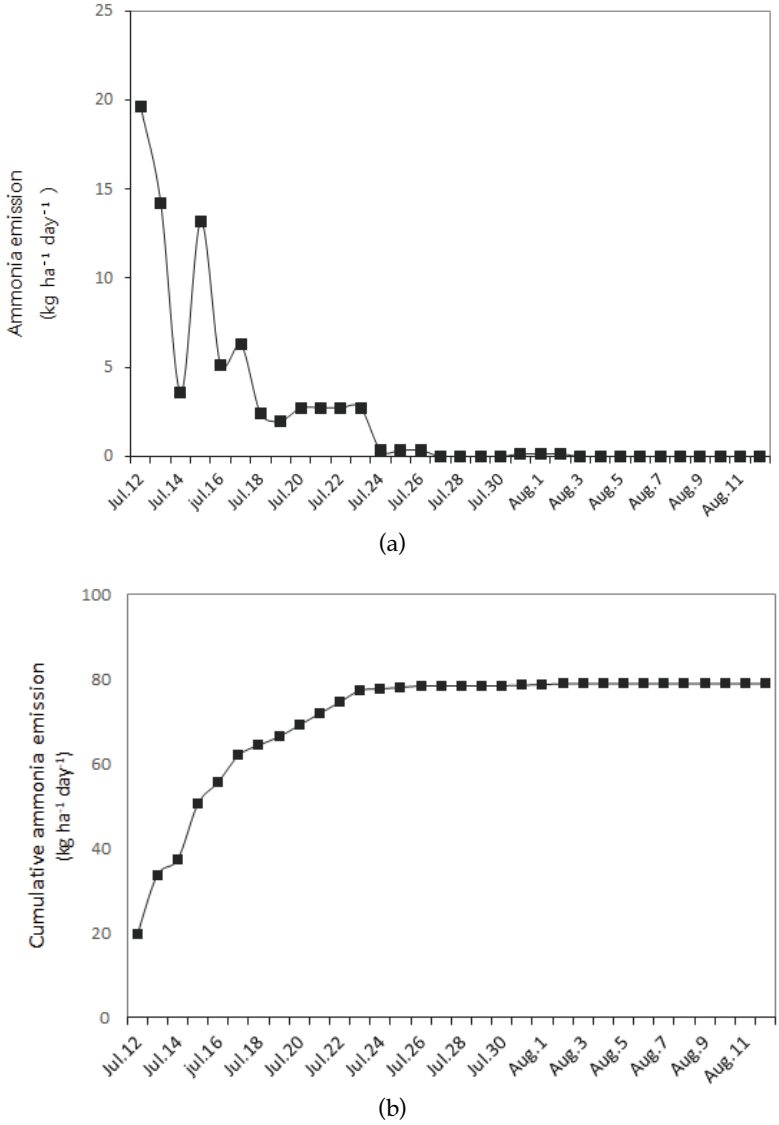


Fig. 5. Ammonia emission (a) and cumulative ammonia emission (b) of poultry manure compost during the application and three time plowing in plastic house. Replication = 3, Standard deviation = 6.26.

지며 특히 6시간 이내에 전체 휘산량의 50% 이상이 휘산된다고 하였다. 따라서, 본 연구의 시험결과도 이와 유사한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

시설재배 잎들깨는 8월 중순에 파종하여 이듬해 6월말까지 잎을 수확하여 재배기간이 8~10 개월로 재포기간이 긴 작물 중 하나이다. 또한 잎을 계속적으로 수확하기 위하여 많은 양의 질소질 비료를 소비하는 작물 중 하나이다. 현장의 농업인 들은 잎들깨 종자 파종 약 1개월 전인 7월 중순에 가축분퇴비를 시용하고 2~3차례 쟁기와 로터리작업을 통해 퇴비의 부숙과정을 거치도록 조처하여 잎들깨 종자의 발아에 유해한 암모니아와 유해가스를 제거하고 있다.

시설재배 잎들깨의 계분퇴비 시용에 의한 암모니아 배출량은 78.9 kg ha^{-1}였으며 계분퇴비의 배출계수(emission factor)는 217.2 kg-NH_3 ton-N로 산정되었다. 배출계수는 투여한 계분퇴비 34.6 ton ha^{-1}의 질소 함유량 363.9 kg N ha^{-1}의 암모니아 배출량인 78.9 NH_3-kg ha^{-1}로부터 환산하여 217.2 kg-NH_3 ton-N으로 산정되었다(Table 4).

8월 16일 토양표면에 다공 비닐멀칭 피복 후 잎들깨 종자를 파종하였다. 잎들깨 종자 파종 후 소형 윈드터널챔버(0.6 m × 0.6 m × 1.2 m)를 설치하여 잎들깨 재배중 암모니아 배출량을 연속적으로 측정하였다(Fig. 6).

잎들깨 식물체가 생장중인 윈드터널 챔버의 암모니아 배출량을 1주일 간격으로 2020년 2월 28일 까지 측정하였으나 암모니아는 거의 포집되지 않았다. 잎들깨 생육의 진전에 따라 83kg ha^{-1}의 질소를 5회 분시 처리하였으나 포집 챔버를 통해 암모니아가 포집이 거의 되지 않은 것은 첫째는 물 공급시 요소비료를 물에 녹여 분무장치로 살포하여 엽면시비 형태로 공급한 점, 둘째는 겨울철 수막재배로 비닐하우스 내부

(a) (b) (c)

Fig. 6. Measurement of ammonia emission by using modified small wind tunnel chamber in plastic house during growing leafy perilla. (a) after seeding, (b) early growing stage, (c) leaf yielding stage.

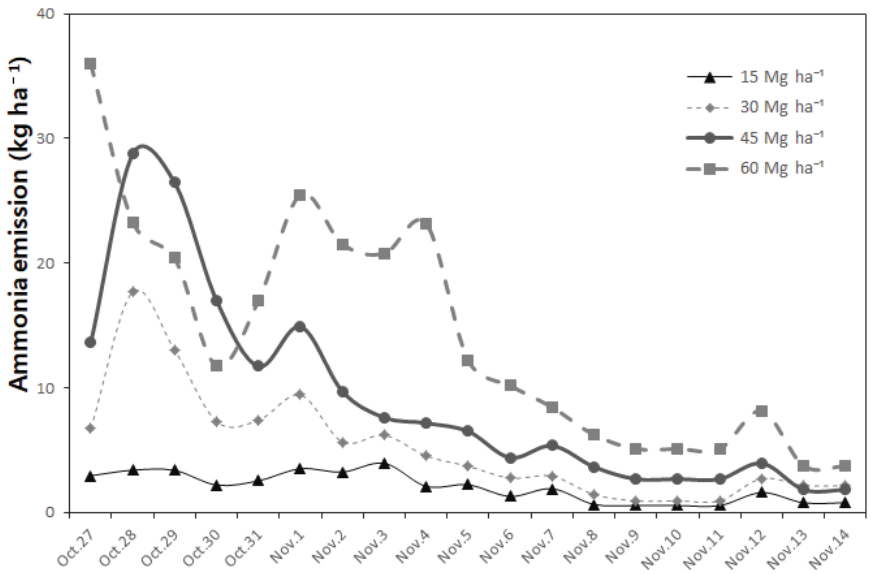


Fig. 7. Ammonia emission of poultry manure compost depend on the different four application level.

공기습도가 매우 높은 점, 셋째는 잎들깨 식물체의 기공을 통한 흡수와 잎들깨 식물 표면의 수분과 결합에 의한 흡착 등이 작용한 결과로 판단된다. Ku[16]는 고추재배시 요소비료 시용 후 토양표면에서 직접 배출되는 NH_3 기체는 총질소 시비량의 36.4% 였고 식물을 포함하는 챔버에서 배출되는 양은 24.1%로 토양표면 배출량 보다 12.3% 낮았다고 하였다. Hayashi 등[17]은 요소 시용 후 논에서 나오는 암모니아 휘산에서 벼는 흡수제 겸 대기 암모니아 방출제 역할을 한다고 하였다.

따라서, 잎들깨 식물체 경엽을 통한 직접적인 흡수와 표면 흡착, 질소시비를 위한 엽면시비에 의한 다습한 환경조건 하에서의 암모니아 포집방법 개선 등은 추가적인 연구를 통해 새롭게 검토되어야 할 것으로 판단된다.

계분퇴비 시용량과 암모니아 배출량

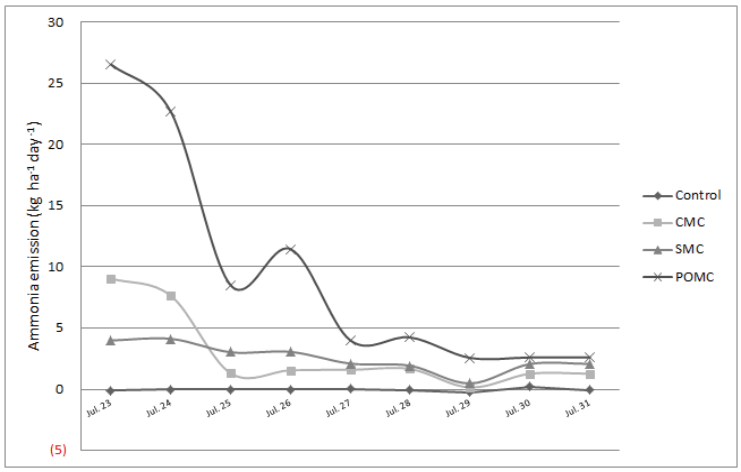
계분퇴비 시용량을 달리하고 이에 따른 암모니아 배출량을 산정한 것은 Fig. 7과 같다. 시설잎들깨 재배농가의 계분퇴비 시용량을 기초로 하여 15 Mg ha^{-1}부터 60 Mg ha^{-1}까지 시용시 암모니아 배출량은 37.8 kg N ha^{-1}에서 267.0 kg N ha^{-1}까지 증가하는 것으로 산정되었다.

여기서 30.0 Mg ha^{-1} 시용시 배출량이 98.3 NH_3-kg ha^{-1}으로 Table 3의 금산의 현지 시험포장의 시용량 34.4 Mg ha^{-1} 시용시의 배출량 78.9 NH_3-kg ha^{-1} 보다 많았는데, 이것은 토양과 퇴비의 교반 강도의 차이 등에 따른 결과로 추정된다.

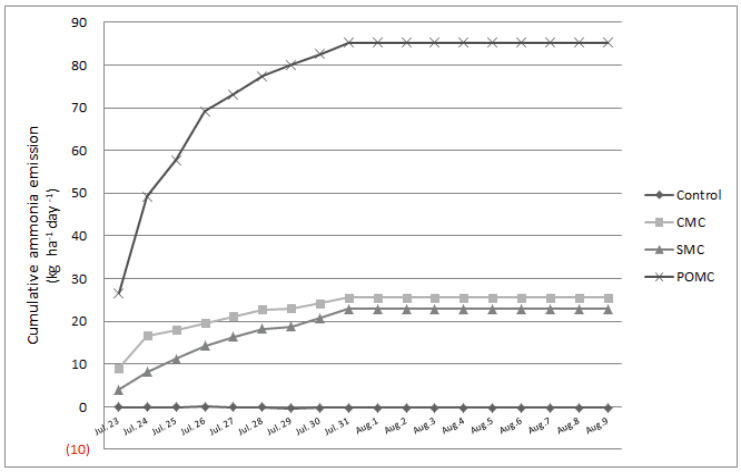
퇴비종류별 암모니아 배출량

2020년 수행한 우분퇴비, 돈분퇴비, 계분퇴비 시용에 따른 암모니아 배출량은 Fig. 8과 배출량과 배출계수는 Table 4와 같다. 암모니아가 주로 배출되는 시기는 퇴비 시용 직후였다.

암모니아 배출량은 우분 25.5 kg ha^{-1}, 돈분 22.8 kg ha^{-1}, 계분 85.2 kg ha^{-1} 였다. 배출계수는 각각 우분퇴비가 70 kg NH_3-ton N, 돈분퇴비가 62.8 kg NH_3-ton N, 계분퇴비가 234.1 kg NH_3-ton N 으로 산정되었다.



(a)



(b)

Fig. 8. Ammonia emission(a) and cumulative ammonia emisssion(b) of cow manure compost, swine manure compost, and poultry manure compost during the application and three time plowing in plastic house. Replication = 3, Standard deviation = 1.27 CMC: Cow manure compost, SMC: Swine manure compost, POMC: Poultry manure compost.

Table 4. Ammonia emission and emission factor with cow manure compost, swine manure compost, and poultry manure compost application in plastic house for leafy perilla cultivation

Year	Compost	Ammonia emission (NH_3-kg ha^{-1})	Emission factor (kg NH_3-ton N)
2019	POMC	78.9	217.2
2020	CMC	25.5	70.0
	SMC	22.8	62.8
	POMC	85.2	234.1

CMC: Cow manure compost, SMC: Swine manure compost, POMC: Poultry manure compost

2019년에 이어 2020년에 계분퇴비는 우분퇴비와 돈분퇴비 보다 암모니아 배출량이 많았는데 본 연구에서 재료로 사용된 퇴비의 암모늄태 질소의 함량은 0.2 % ~ 1.37 %로 다양한 재료와 혼합되어 있는 상태로 계분의 암모니아 배출량과 암모늄태 질소 함량과의 관계가 명확하지 않다. Atia[15]는 반고체 형태의 가축 생분의 암모늄태 질소의 함량은 계분이 4.2 kg ton, 돈분이 2.4 kg ton, 우분이 0.8~1.9 kg ton이라 했다. 따라서, 이것은 추후 상세히 검토되어야 할 것으로 판단된다.

무처리구의 암모니아 배출량은 - 0.29 kg ha^{-1}로 음(-) 값을 나타내었다. 이것은 입구부로 부터 윈드터널챔버 내부로 들어온 공기 중의 암모니아가 챔버 벽면의 미량의 습기와 결

합하거나 토양 표면의 토양입자에 흡착된 결과로 추정된다.

한편, 환경부의 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(2013)에 의하면 비료사용 농경지의 암모니아 배출량 산정방법은 제시하고 있으나, 배출계수 산정방법을 적시하고 있지는 않고 있다. 따라서 우리나라 농업 연구현장의 상황에 적합한 배출계수 산정방법의 정립도 필요하다고 판단된다.

계분퇴비 가스성분

계분퇴비 시용 직후 채취한 가스 성분을 SIFT-mass 를 이용해 분석한 결과는 Table 5와 같다. 전체 분석된 가스상 물질은 37개 였다. 이들 가스상 물질을 평균농도 순으로 보면 ammonia의 농도가 가장 높았고 acetaldehyde, nitrogen dioxide, acetone, ethyl methyl sulfide 순으로 농도가 높았다.

시설재배지는 작물재배 전 퇴비살포 작업이 시설 내부에서 이루어지므로 퇴비에서 배출되는 다양한 유해가스에 노지보다 더 고농도로 작업자가 노출될 수 있다. 실제 퇴비살포 후 비닐하우스 내부에서 포터블 암모니아 측정기로 측정한 결과 초기 4~5일 동안 암모니아가 외부로 신속히 배출되지 않고 정체되어 고농도로 측정되기도 하였다.

따라서 향후 이에 대한 유해성 평가와 농작업자 안전 작업 지침 마련을 위한 추가 연구의 수행이 필요한 것으로 판단된다.

Le 등[18]은 가축 사육시설에서 발생하는 악취물질은 황화합물, phenol과 indole류, 휘발성 지방산(VFA), 암모니아와 휘발성 amin류 등 4 그룹이 있고 168개 화합물이 있다고 하였다. 본 연구에서 사용한 시판 계분퇴비에서는 37개의 가스상 물질이 분석되어 가축분 퇴비의 농경지 시용시 다양한 가스 상 물질이 배출됨을 확인할 수 있었다.

De-Xi 등[19]은 벼농사를 위해 논에 투여된 질소비료의 암모니아 손실율은 11%에서 17% 까지 다양한데 논에서 투여된 질소비료의 17.7%가 암모니아로 손실된다고 하였고, Wang 등[20]은 전체 벼 생육 단계에서 암모니아 휘산에 의한 총 암모니아 손실은 적용된 질소의 9.0%에서 16.7%까지였다고 하였다. Park 등[21]은 배추재배 밭토양에 FeSO4 처리로, Lee 등[22]은 콩재배 밭토양에서 미생물 제재 처리로 암모니아의 배출을 줄일 수 있다고 하였다. 이와같이 농경지에 투입된 질소비료의 암모니아 배출량 산정 연구들과 달리 퇴비를 이용한 암모니아 배출량 산정연구는 퇴비의 주요 구성원재료의 성질과 pH, 수분함량, 질소함량 등이 균일하지 않아 암모니아 배출량을 산정하는데 어려운 점이 많았다.

Table 5. Poultry manure compost volatilized gaseous components

Ranking	Compounds name	1st	2nd	3rd	4th	5th	Ave. Con. (ppm)
1	ammonia	99	127	61.8	170	190	129.6
2	acetaldehyde	16	20	15	58	65	34.6
3	nitrogen dioxide	36	30	29	25	34	30.7
4	acetone	6.4	6.7	13.6	38.7	37.5	20.6
5	ethylmethylsulfide	7.4	9.6	16.1	29.2	28.3	18.1
6	ethyl chloride	13.0	11.0	26.0	13.0	10.0	14.6
7	2-methyl-2-propanol	5.6	5.7	9.0	7.8	10.2	7.7
8	trimethylamine	6.2	1.7	5.9	5.2	3.1	4.4
9	3-mercapto-1-propanol	2.3	2.2	5.6	3.4	4.5	3.6
10	ethyl heptanoate	4.4	4.2	2.1	2.7	1.9	3.1
11	propanoic acid	2.7	3.0	2.9	2.6	2.2	2.7
12	butanone	1.7	2.0	2.3	3.5	4.3	2.7
13	butanal	1.5	4.4	1.7	1.9	2.6	2.4
14	3-methyltetrahydrofuran-3-one	2.4	2.1	3.3	1.2	2.0	2.2
15	methacrylicacid	2.4	1.8	2.0	1.9	2.0	2.0
16	diethylsulfide	1.0	2.3	2.6	1.5	2.2	1.9
17	3-methylthio-2-butanone	2.2	1.5	2.8	1.2	1.3	1.8
18	dimethyl sulfide	0.76	0.68	3.75	2.00	1.25	1.7
19	acetoin	1.9	1.7	1.7	1.0	1.3	1.5
20	styrene	1.8	1.5	1.2	1.3	1.2	1.4
21	1,4-butyrolactone	0.88	1.22	1.10	1.28	1.08	1.1
22	gamma-octalactone	0.58	0.73	0.61	0.90	0.52	0.7

Ave. Con.: average concentration

2016년 전라북도 농업기술원에서 38개 업체에서 생산된 퇴비를 조사한 것을 보면 퇴비의 주성분은 우분, 계분, 톱밥, 돈분, 수피, 기타 순이었고 평균적인 수분함량은 38%, 유기물 함량은 69%, 질소성분은 1.71%, C/N 율은 40 이었으며 생산업체 간 성분함량 등 편차가 컸다.

우리나라 국민들의 육류소비가 늘어감에 따라 가축분뇨의 발생량도 꾸준히 증가하여 176,434 ton day^{-1}이며 이의 72%인 127,108 ton day^{-1}이 퇴비와 액비로 농경지에 투입된다(환경부, 가축분뇨 처리통계, 2017). 환경부의 대기오염물질 배출량 통계(CAPPS) 산정을 위해 시군단위별로 가축분뇨 발생량은 산정되고 있으나 자원화를 위해 가축분뇨의 72% 가 가축분퇴비 형태로 농경지에 투여되고 있어, 농경지 가축분퇴비 살포에 의한 암모니아의 배출량 산정과 배출계수의 개발이 필요한 실정이다. 또한 국가단위의 배출량 산정을 위하여 가축분퇴비의 생산, 유통, 판매량에 관한 자료도 매년 새롭게 조사하여 갱신할 필요가 있다.

따라서, 향후 논과 밭 등 농경지의 가축분퇴비의 종류별 암모니아 배출량 산정 추가 연구를 통하여 배출계수의 고도화가 필요하며 지속적인 판매량 등 활동자료의 갱신이 필요하다. 농업생산과 자원 재활용을 위해 질소원으로서 농경지에 가축분퇴비의 사용을 피할 수 없으나, 앞으로는 암모니아 배출에 의한 환경 유해성도 함께 고려해야 하고 배출 저감기술 개발을 위해 노력해야 할 것으로 판단되었다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ014206)", National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

1. Hristov AN (2011) Contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter (PM2.5) in the United States. Journal of American Dairy Science, 94(6), 3130-3136. https://doi.org/10.3168/jds.2010-3681.
2. Domingo NGG, Balasubramanian S, Thakrar SK, Clark MA, Adams PJ, Marshall JD, Muller NZ, Pandis SN, Polasky S et al. (2021) Air quality-related health damages of food. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(20), e2013637118. https://doi.org/10.1073/pnas.2013637118.
3. Jiang B, Xia D (2017) Role identification of NH_3 in atmospheric secondary new particle formation in haze occurrence of China. Atmospheric Environment, 163, 107-117. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.035.
4. Wu Y, Gu BJ, Erisman JW, Reis S, Fang YY, Lu XH, Zhang XM (2016) PM 2.5 pollution is substantially affected by ammonia emissions in China. Environmental Pollution, 218, 86-94. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.027.
5. Suanne W, Elisabeth A, Olga B, Jurgen Z (2015) Costs and benefits of ammonia and particulate matter abatement in German agriculture including interactions with greenhouse gas emissions. Agricultural Systems, 141, 58-68. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.09.003.
6. Kim ST, Bae CH, Kim BU, Kim HC (2017) PM 2.5 simulations for the Seoul metropolitan area: (I) Contributions of precursor emissions in the 2013 CAPSS emissions inventory. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(2), 139-158. https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.139.
7. Gong L, Lewicki R, Griffin RJ, Tittel FK, Lonsdale CR, Srevens RG, Pierce JR (2013) Role of atmospheric ammonia in particulate matter formation in Houston during summertime. Atmospheric Environment, 77, 893-900. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.079.
8. Zhao ZQ, Bai ZH, Winiwarter W, Kiesewetter G, Heyes C, Ma L (2017) Mitigating ammonia emission from agriculture reduces $PM_{2.5}$ pollution in the Hai River Basin in China. Science of The Total Environment, 609, 1152-1160. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.240.
9. WU SP, Zhnag YJ, Scwab JJ, Li YF, Liu YL, Yuan CS (2017) High-resolution ammonia emissions inventories in Fujian, China, 2009-2015. Atmospheric Environment, 162, 100-114. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.027.
10. Reis S, Howard C, Sutton MA (2015) Cost of ammonia abatement and the climate co-benefits, p. 4, London Springer, UK.
11. Shin DW, Joo HS, Seo EJ, Kim CY (2017) Management strategies to reduce PM 2.5 emission: emphasis-ammonia, pp. 69-70, Korea Environment Institute, Korea.
12. Yun HB, Lee Y, Lee SM, Kim SC, Lee YB (2008) Evlauation of ammonia emission following application techniques of pig manure compost in upland soil. Korean Journal of Environmental Agriculture, 28(1), 15-19. https://doi.org/10.5338/KJEA.2009.28.1.015.
13. Meisinger, J.J., Lefcourt, A. M., Thompson, R. B.

(2001) Construction and validation of small mobile wind tunnels for studying ammonia volatilization. Applied Engineering of Agriculture, 17, 375-381.
14. Missellbrook TH, Smith KA, Johnson RA, Pain BF (2002) Slurry application techniques to reduce ammonia emissions: results of some UK field-scale experiments. Biosystems Engineering, 81(3), 313-321. https://doi.org/10.1006/bioe.2001.0017.
15. Atia A (2008) Ammonia volatilization from manure application. https://open.alberta.ca/dataset/4182162/resource/863253f1-22f1-4a7b-950a-c424ef5cc9e5.
16. Ku HH (2020) Measurement of soil surface and plant canopy ammonia flexes in red pepper fields using dynamic chamber method. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 53(4), 643-649. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.643.
17. Hayashi K, Nishimura S, Yagi K (2008) Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia. Science of the Total Environment, 390(2-3), 485-494. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.037.
18. Le PD, Aarnink AJA, Ogink NWM, Becker PM, Verstegen MWA (2005) Odor from animal production facilities: its relationship to diet. Nutrition Research Reviews, 18, 3-30. https://doi.org/10.1079/NRR200592.
19. De-Xi L, Xiao-Hui F, Feng H, Hong-Tao Z, Jia-Fa L (2007) Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake region, China. Pedosphere, 17(5), 639-645. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60076-9.
20. Wang HG, Zhang D, Zhang Y, Zhai L, Yin B, Zhou B, Geng Y, Pan J, Luo BJ et al. (2018) Ammonia emissions from paddy fields are underestimated in China. Environmental Pollution, 235, 482-488. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.103.
21. Park SM, Kim SN, Hong CH (2020) Effect of reducing ammonia volitilization from the arable soil with iron sulfate. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 53(4), 405-414. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.405.
22. Lee SM, L JH, Park JH, Hwang SW, Seo DC (2020) Characteristics of ammonia gas emission from soybean cultivation soil with biochar, fly ash, and microorganisms. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 53(4), 528-537. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.528.