

Research Article



CrossMark

Open Access

## 배추 재배지에서 요소시비에 따른 암모니아 배출계수 산정

이수림<sup>1</sup>, 이재훈<sup>1</sup>, 노준석<sup>1</sup>, 박유진<sup>3</sup>, 최아영<sup>1</sup>, 김신실<sup>1</sup>, 이슬린<sup>1</sup>, 박종환<sup>2</sup>, 서동철<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>경상국립대학교 응용생명과학부, <sup>2</sup>동아대학교 생명자원산업학과, <sup>3</sup>경상국립대학교 환경생명화학과 & 농업생명과학연구원

### Ammonia Gas Emission Factor at different Application Rate of Urea in Chinese Cabbage Cultivation

Su-Lim Lee<sup>1</sup>, Jae-Hoon Lee<sup>1</sup>, Jun-Suk Rho<sup>1</sup>, Yu-Jin Park<sup>3</sup>, Ah-Young Choi<sup>1</sup>, Sin-Sil Kim<sup>1</sup>, Seul-Rin Lee<sup>1</sup>, Jong-Hwan Park<sup>2</sup> and Dong-Cheol Seo<sup>3\*</sup> (<sup>1</sup>Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, <sup>2</sup>Department of Life Resources Industry, Dong-A University, Busan 49315, Korea, <sup>3</sup>Department of Applied Life Chemistry & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea)

Received: 15 February 2022/ Revised: 20 March 2022/ Accepted: 23 March 2022

Copyright © 2022 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

Su-Lim Lee

<https://orcid.org/0000-0001-8857-2895>

Jae-Hoon Lee

<https://orcid.org/0000-0002-5517-8987>

Jun-Suk Rho

<https://orcid.org/0000-0003-2100-5903>

Yu-Jin Park

<https://orcid.org/0000-0001-8841-4504>

Ah-Young Choi

<https://orcid.org/0000-0002-5811-2051>

Sin-Sil Kim

<https://orcid.org/0000-0003-2427-4164>

Seul-Rin Lee

<https://orcid.org/0000-0003-4674-1974>

Jong-Hwan Park

<https://orcid.org/0000-0001-7296-0439>

Dong-Cheol Seo

<https://orcid.org/0000-0001-8515-0670>

#### Abstract

**BACKGROUND:** The main source of ammonia in soils, South Korea is agricultural emissions (e.g., fertilizer application and livestock manure), with the recent emission inventories reporting them to be approximately 80% of the total emissions. Ammonia as a pollutant is originated largely from agricultural activity and is an important contributor to air quality issues in South Korea. The importance of ammonia in agricultural land is also emerging. In this study, the characteristics of ammonia emission from Chinese cabbage cultivation fields with application rates of urea were evaluated.

**METHODS AND RESULTS:** The ammonia emission

characteristics were investigated at the different urea application rates (0, 160, 320, and 640 kg ha<sup>-1</sup>) and the ammonia emission factor in the Chinese cabbage cultivation field was calculated. As application rate of urea application increased, ammonia emissions increased proportionally. In 2020 and 2021, cumulative ammonia emissions with urea 320 kg ha<sup>-1</sup> treatment were 39.3 and 35.2 kg ha<sup>-1</sup>, respectively for 2020 and 2021. When urea fertilizer was applied, the ammonia emission factors were 0.1217 and 0.1358 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N kg N kg<sup>-1</sup> in 2020 and 2021, respectively.

**CONCLUSION(S):** Ammonia emissions increased as application rate of urea increased, and the average ammonia emission factor of the Chinese cabbage cultivation field for two years was 0.129 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N kg N kg<sup>-1</sup>.

**Key words:** Ammonia, Ammonia emission factor, Chinese cabbage cultivation, Fine particles, Urea

\* Corresponding author: Dong-Cheol Seo  
Phone: +82-55-772-1963; Fax: +82-55-772-1969;  
E-mail: dcseo@gnu.ac.kr

## 서론

암모니아는 대기중의 질소산화물, 황산화물 등과 오존 및 수분과 같은 반응인자와 광화학반응을 일으켜 미세먼지의 주요 구성물질인 질산암모늄, 황산암모늄 등의 2차 미세먼지인 PM<sub>2.5</sub>를 생성하는 것으로 알려져 있다[1]. 2차 생성 미세먼지의 주요 전구물질 중 암모니아는 주로 약취물질 규제대상으로 관리되어 초미세먼지 전구물질로의 관리는 이루어지지 않아 대기오염물질 관리 차원의 연구는 전무하다[2]. 그러나 최근 농경지가 암모니아의 주요한 배출지로 알려지면서 암모니아로 인한 2차생성 미세먼지에 대한 중요성이 대두되고 있다. 농업부문 암모니아 배출량(2019년 기준)은 252,444 ton/year으로 우리나라 전체 암모니아 배출량 316,299 ton의 약 79.8%가 발생되고 있으며, 주 배출원은 비료사용량과 가축사육 두수 증가로 알려져 있다[3].

농업에서 작물의 생산량을 증대하거나 품질을 높이기 위해서 질소비료는 필수적으로 사용된다. 질소비료로는 유안, 요소 등이 있고, 국내에서는 요소(urea)를 많이 사용하는데, 토양에서 요소의 분해과정 중에 많은 양의 암모니아가 배출된다[4]. 하지만 현재 우리나라에서는 작물별 및 질소비료별 암모니아 배출계수 산정이 진행중인 상황이며, 국내 암모니아의 배출원에 대한 통계 및 관련된 정보 등이 충분하지 않아 배출원에 대한 현황 파악이 어려운 실정이다[5]. Hong 등[6]은 시설 유희재 재배 시 퇴비 시용량 및 퇴비종류에 따른 암모니아 배출량을 평가하여 우분퇴비, 돈분퇴비 및 계분퇴비의 암모니아 배출계수가 각각 70, 62.8 및 234.1 kg NH<sub>3</sub>-tonN으로 산정되었다. Kim 등[7]은 복합비료(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=12-7-9)시비에 따른 사과 및 배 과수원의 암모니아 배출계수를 각각 10.4 및 15.4 kg NH<sub>3</sub>/ton으로 산정하였다. Park 등[8]의 연구에 의하면, 콩재배지 토양의 포트실험에서 온도, 수분 및 요소처리량에 따른 암모니아 배출특성을 조사하여 환경조건이 암모니아 배출에 미치는 영향을 규명하였다. 최근 들어 몇몇 연구자들에 의해 논과 밭에서 배출계수 산정연구가 진행중에 있으며, 토양개량제, 바이오차 및 미생물에 의한 암모니아 배출저감방안 연구도 일부 수행중에 있다[6-8]. 특히 밭에서는 작물종류와 비료종류에 따른 암모니아 배출계수가 따로 산정되어야 하므로 각 작물과 비료종류에 따른 암모니아 배출특성을 파악하여 인벤토리를 구축할 필요가 있으며, 이들 결과는 장기적으로 농업부분에서의 미세먼지 발생량을 예측하거나, 미세먼지 저감 연구를 하기 위한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 배추 재배지에서 요소 처리량에 따른 암모니아 배출특성을 2년간 조사하고, 이들 결과를 활용하여 배추 재배지에서 요소 처리에 따른 배출계수를 산정하고자 하였다. 이들 결과는 향후 배추 재배지에서 요소에 의한 미세먼지 원인물질인 암모니아 배출량을 예측할 수 있는 지표로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 재료 및 방법

### 공시재료

본 연구는 경상남도 사천에 위치한 경상국립대학교 부속 농장(35°10'84.91"N, 128°11'91.55"E)에서 수행하였다. 실험에 사용된 공시 토양의 분석결과는 Table 1과 같다. 공시토양 pH는 2020년에 비해서 2021년에 약간 증가하였는데, 이는 2020년의 배추 재배 시 처리한 석회 영향인 것으로 사료되며, 2021년에 유기물함량이 전년도에 비해 증가된 것은 봄 배추 재배이후 겨울에 녹비작물인 밀을 재배한 후 토양에 유기물을 혼합한 후 봄 배추 실험을 하였기 때문으로 판단된다.

본 실험에 사용된 배추는 봄배추인 춘광(*Brassica rapa* L.)이다. 춘광은 추대가 안정된 봄배추로, 저온 및 고온결구력이 강해 재배 폭이 넓다는 특징이 있으며, 외엽색이 농록색으로 진한 표피 원통형의 배추로 노균병 및 연부병에 비교적 강하여 재배가 용이한 특성을 가지고 있다.

### 처리구 및 재배 관리

요소 처리량에 따른 암모니아 배출특성을 분석하고 배추 재배지에서 암모니아 배출계수를 산정하기 위해, 요소 처리량 320 kg ha<sup>-1</sup>을 기준량으로 0, 160(반배량), 320(기준량) 및 640(두배량) kg ha<sup>-1</sup>로 처리하여 토양으로부터 배출되는 암모니아 함량을 조사하였다. 각 처리구의 크기는 가로 2 m, 세로 3 m로 면적은 6 m<sup>2</sup>이었으며, 난괴법(Randomized complete block design)에 따라 3반복으로 배치하였다. 배추 정식 전 토양에서 배출되는 암모니아를 조사하기 위해서 일주일 동안 5반복으로 분석하여 암모니아가 거의 배출되지 않는 것을 확인한 이후 본 실험을 수행하였다. 배추(*Brassica rapa* L.)모종은 2020년 4월 8일과 2021년 4월 10일에 이랑 간격 65 cm, 배추 간격 40 cm로 처리구당 18주를 각각 정식하였으며, 기비는 배추 정식일에 함께 처리하였다. 추비는 약 15일을 주기로 총 3번을 처리하였고, N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O의 처리일시는 Table 2, 처리량은 Table 3에서 보는 바와 같다. 배추 재배지 내 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>와 K<sub>2</sub>O는 각각 용성인비와 염화가리를 사용하였다.

Table 1. Chemical properties of soil used in 2020, 2021

Year	pH	EC	OM	T-N	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn
	1:5	dS m <sup>-1</sup>	--- g kg <sup>-1</sup> ---		mg kg <sup>-1</sup>		----- cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> -----			--- mg kg <sup>-1</sup> ---	
2020	5.5±0.03	0.2±0.01	8.4±1.5	0.73±0.1	167.5±12.6	0.5±0.07	4.6±0.3	1.9±0.05	0.07±0.01	14.4±2.5	42.5±1.1
2021	6.1±0.05	0.2±0.07	9.9±1.2	0.54±0.1	158.1±20.5	0.3±0.06	6.4±1.2	1.9±0.1	0.10±0.01	26.6±3.1	19.8±1.5

Table 2. Treatment conditions for fertilizer application

(Unit : mm/dd)

Year	Plant cabbage	Basal fertilization	Additional fertilization			Harvest
			1 <sup>st</sup> treatment	2 <sup>nd</sup> treatment	3 <sup>rd</sup> treatment	
2020	4/8	4/8	4/22	5/11	5/27	6/10
2021	4/10	4/10	4/23	5/8	5/22	6/17

Table 3. Fertilizer application conditions for N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O(Unit : N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)

Treatment	Total	Basal fertilization	Additional fertilization		
			1 <sup>st</sup> treat.	2 <sup>nd</sup> treat.	3 <sup>rd</sup> treat.
			kg ha <sup>-1</sup>		
Control	-	-	-	-	-
Urea 160 kg ha <sup>-1</sup>	160-78-198	56.5-78-79	30-0-26	36.5-0-66	36.5-0-26
Urea 320 kg ha <sup>-1</sup>	320-78-198	113-78-79	60-0-26	73-0-66	73-0-26
Urea 640 kg ha <sup>-1</sup>	640-78-198	226-78-79	120-0-26	146-0-66	146-0-26

### 암모니아 포집

배추 재배지에서 발생하는 암모니아를 포집하기 위해서 static chamber법을 사용하였으며, 챔버의 지름은 12.5 cm, 높이는 30 cm로, 표면적은 113 cm<sup>2</sup>이었다. 챔버는 각 처리구의 정 중앙에 깊이 15 cm로 설치하였다. 암모니아는 챔버 설치 후 24시간 동안 포집하여 배추 생육시기인 65일 동안 샘플링 하였으며, 수확 후부터 암모니아 배출이 완료될 때 까지 주 1회씩 시료를 채취하였다. 챔버 내에는 2개의 스펀지가 설치되어 있으며, 아래쪽은 토양에서 발생하는 암모니아 포집용이며, 위쪽은 대기로부터 유입되는 암모니아 차단용이다. 암모니아를 포집하기 위해서 1 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>와 1% glycerol을 1:1로 혼합한 용액 30 mL를 스펀지에 흡수하여 챔버내에 삽입하였으며, 24시간 후에 샘플링한 스펀지는 2 M KCl 150 mL에 침지시켜 암모니아를 침출하였다. 침출된 용액 내 암모니아를 인도페놀법으로 분석하였으며, UV-VIS spectrophotometer (Perkinelmer, USA)를 사용하여 630 nm 파장에서 용액 내 암모니아를 정량하였다. 암모니아 배출량은 분석된 암모니아 결과 값으로 식 (1)을 통해 일일 단위면적당 암모니아 배출량으로 환산하였다.

NH<sub>3</sub>-N(mg/m<sup>2</sup>/day):

$$\frac{C \times V}{t \times A} \times \frac{14.0067}{(14.0067 + (1.00794 \times 4))} \times p \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

C : NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(mg/L)

V : 샘플부피(mL)

t : 포집시간(h)

A : 암모니아 챔버 면적(m<sup>2</sup>)

p : 대기밀도(mg/cm<sup>3</sup>)

T : 기온(°C)

### 토양 및 작물 분석

배추의 생육특성 조사는 농촌진흥청의 농작물 생육조사 규정을 참고하여 엽수, 엽장, 엽폭 및 생체중을 측정하였으며, 100°C 건조기에서 48시간 건조한 후 건물중을 측정하였다. 작물의 수량과 수량지수는 생육조사를 기반으로 계산하여 산정하였다.

토양의 pH와 EC는 토양과 물을 1:5 비율로 하여 30분 동안 교반 한 후 pH meter(Orion 2 Star, Thermo scientific Singapore)와 EC meter(COM-100, HH Digital, USA)를 이용하여 측정하였다. 유기물 함량 분석은 Tyurine법을, Avail. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>는 Lancaster법을 사용하여 분석하였다. 총 질소 및 K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn 등의 미량성분 함량을 분석하기 위해서 분해액으로 습식분해하였다. 총 질소 함량은 kjeldahl 법을, 중금속과 그 이외의 무기성분들은 ICP-OES(Perkinelmer, USA)를 이용하여 분석하였다.

식물체 내 T-N, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn 및 Zn 함량은 토양의 화학적 특성과 동일하게 분석하였으며, T-P함량은 Vanadate법을 이용하여 분석하였다.

### 통계분석

배추 재배지에서 발생한 암모니아의 누적 배출량과 배추의 수량, 토양 및 식물체의 무기성분함량을 통계분석하기 위해서 SPSS(IBM SPSS Statistics 25) 프로그램을 사용하였다. 처리구간의 차이를 비교하기 위해서 SAS(SAS 9.4 TS Level 1M4)프로그램의 ANOVA procedure를 사용하여 Duncan법(Duncan's multiple range test)을 통해서 분산 분석하였다. 처리구간의 유의성은 5% 이내 (p=0.05)의 범위에서 분석하였다.

### 결과 및 고찰

#### 요소 처리 수준에 따른 암모니아 배출특성 평가

2년 동안 배추 재배지에서 발생하는 암모니아 배출량을 작

물 생육 기간에 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 1-2에 나타나 있다. 2020년에는 모든 요소 처리구에서 기비 후에 암모니아 배출량이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 없었으며, 각 추비 시 마다 암모니아 배출량이 증가하였다. 1차 추비 후 암모니아 배출량은 점진적으로 증가하여 7일 후에 요소 처리량이 가장 많은 Urea 640 kg ha<sup>-1</sup> 처리구에서 일일 암모니아 배출량은 3678.8 g ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>으로 다른 요소 처리구에 비해 가장 높았다. Urea 320 kg ha<sup>-1</sup> 처리구에서 암모니아 배출량은 Urea 160 kg ha<sup>-1</sup> 처리구에 비해 약 4배 차이가 났다. Choi 등[9]의 연구에서 암모니아 배출은 비료를 투입한 후 10일 동안 가장 활발하게 일어났으며, 이 기간동안 총 배출량의 약 65%가 배출되었다고 하였다. 본 연구에서도 유사하게 1차 추비 이후 10일 동안 2차 추비 전 까지 총 암모니아 배출량의 약 61~70%가 배출되었다. 2차 추비 5일 후에 암모니아 배출량이 최대가 되었으며, 1차 추비에 비해 2일정도 빨랐다. 이때 Urea 160 kg ha<sup>-1</sup> 처리구와 Urea 320 kg ha<sup>-1</sup> 처리구의 암모니아 배출량 차이는 약 5.5배로 1차 추비와 유사하게 실제 요소 처리량의 2배 차이보다 훨씬 더 큰 차이를 보였다. 이는 요소를 처리하였을 때 일시적으로 토양에 분해되어 흡수될 수 있는 양이 제한적이기 때문에 휘산량이 상대적으로 증가한 것으로 사료된다. 3차 추비 이후의 암모니아 배출량은 1, 2차 추비와 달리 암모니아가 급격하게 배출되는 패턴이 확인되지 않았는데, 이는 강수의 영향으로 판단된다. 일반적으로 요소가 분해되어 휘산 될 때 수분함량은 매우 중요한 인자로 작용하며, 토양 수분함량이 높을수록 암모니아 배출량이 증가하는 것으로 알려져 있다[10]. 따라서, 3차 추비 이후에

는 적은 강수량으로 인한 낮은 WFPS(Water filled pore space)가 요소의 분해를 억제한 것으로 판단된다. 배추를 수확한 후에는 암모니아 배출량이 점진적으로 감소하여 거의 배출되지 않았다.

2021년의 기비 후 암모니아 배출량은 2020년과 달리 요소를 시비한 모든 처리구에서 점진적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 기비 9일 후 Urea 160 kg ha<sup>-1</sup>, Urea 320 kg ha<sup>-1</sup>, Urea 640 kg ha<sup>-1</sup> 처리구에서 암모니아 배출량은 각각 250 g ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, 531 g ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, 1,930 g ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>으로, 기비 후 부터 1차 추비 전 까지 누적 암모니아 배출량은 2020년에 비해 각각 약 82, 85, 90% 증가하였다. 1차 추비 후부터 2차 추비 전 까지 요소 처리량에 따른 암모니아 누적배출량은 2021년이 2020년에 비해 약 30% 낮았는데, 이는 2020년에 기비 후 배출되지 않은 암모니아가 1차 추비 후 누적되어 배출되었기 때문이다. 3차 추비 4일 후에 모든 요소 처리구에서 암모니아 배출량이 급격하게 증가하는 경향이었으며, 2020년의 3차 추비 후 암모니아 배출량이 급격하게 증가하는 구간이 없었던 것과는 달랐는데, 이는 2020년의 3차 추비 후 낮았던 강수량과 달리 2021년에는 3차 추비 후 강수량이 많아 이로 인해서 암모니아 배출량이 더 증가하였기 때문으로 판단된다.

이상과 같이 2년간 연차별 암모니아 배출패턴의 차이는 강우에 의한 토양수분 함량의 차이가 가장 큰 원인으로 판단된다. 이러한 차이를 2020년과 2021년의 암모니아 배출특성비교를 통해 분석하였다. Wang 등[11]의 연구에서 암모니아 배출량은 초기 7일내에 급격하게 발생하는 구간이 나타난다

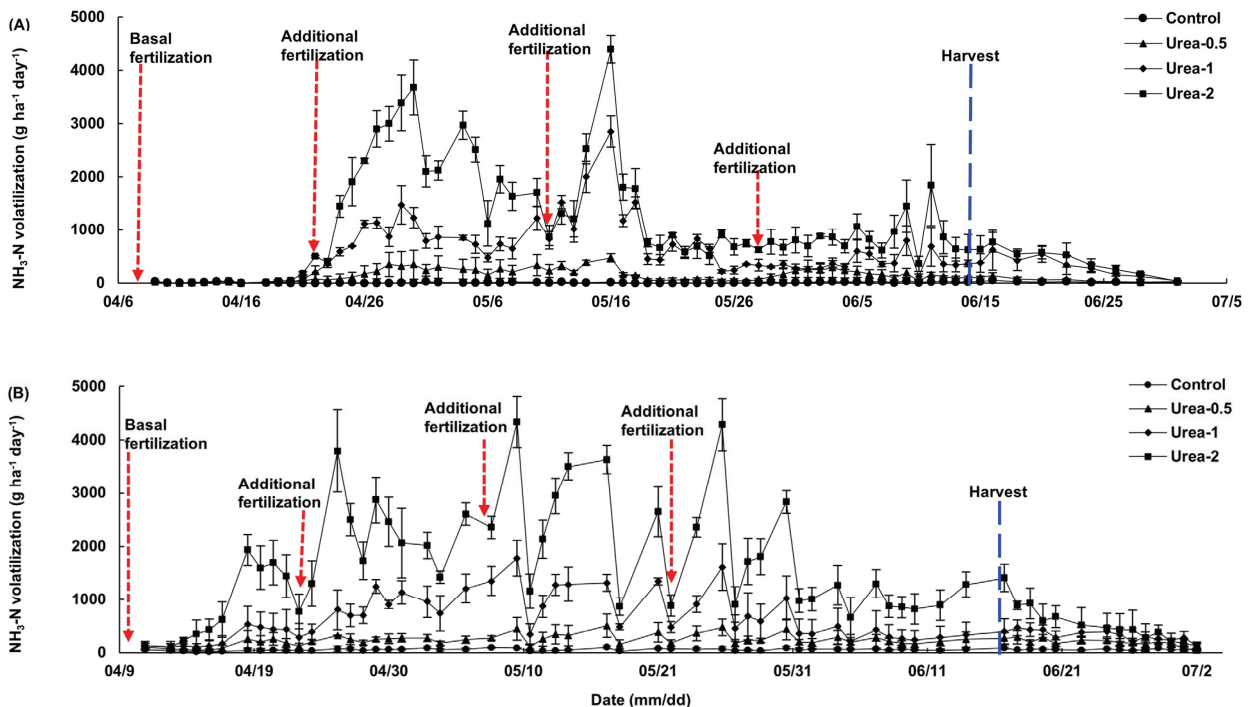


Fig. 1. Characteristics of ammonia emission under different urea application rates for 2 years [(A) 2020 year, (B) 2021 year, Control : Urea 0 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-0.5 : Urea 160 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-1 : Urea 320 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-2 : Urea 640 kg ha<sup>-1</sup>].



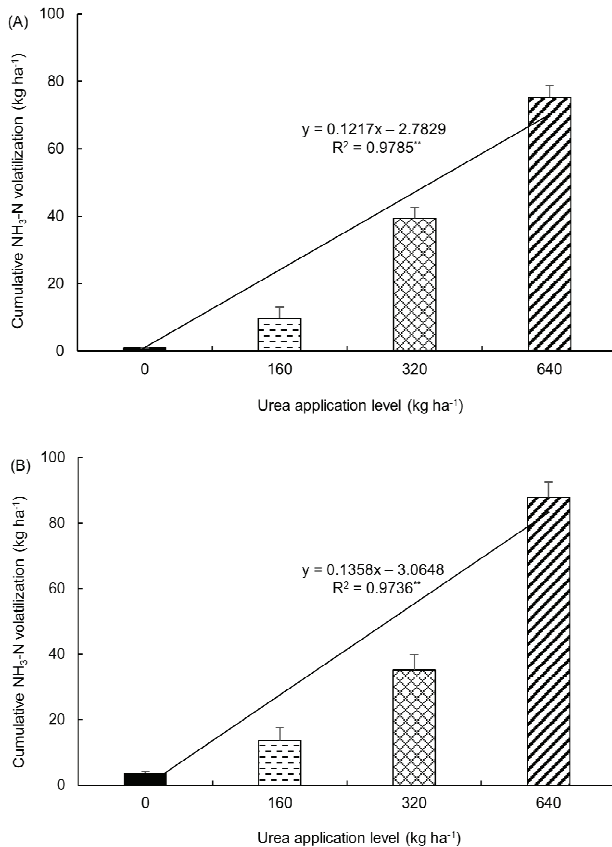
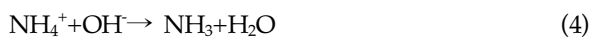
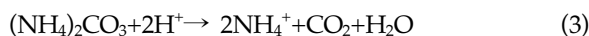


Fig. 2. Cumulative ammonia emission and determined ammonia emission factor under different urea application rates for 2 years [(A) 2020 year, (B) 2021 year].

고 하였는데, 2020년의 결과와는 다른 패턴이었다. 초기에 배출되는 암모니아는 재배 초반에 일정량 이상의 강수와 더불어 저서 토양의 수분함량이 높아짐에 따라 요소의 분해가 촉진되어 암모니아 배출량이 급격하게 증가하게 된다[12]. 하지만 2020년 재배 초기에 WFPS는 약 25%로 매우 낮았다가 강수로 인해서 재배 9일후에 52%까지 급격하게 증가하였다 (Fig. 3). 따라서, 2020년 기비 후에 암모니아 배출량이 급격하게 증가하는 구간이 없었던 것으로 판단된다. 2021년에는 정식 2일 후 강수로 인해서 WFPS가 48.8%까지 증가하였고, 기비 후 암모니아 배출량이 점진적으로 증가하였다. 2020 및 2021년 모두 WFPS가 급격하게 증가한 이후로 암모니아 배출량이 점진적으로 증가하였는데, 요소의 분해작용에 의해 토양 수분함량이 증가하게 된 이후로 요소의 분해가 촉진되어 암모니아 배출량이 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 요소로부터 암모니아가 배출되는 과정은 식 (2),(3),(4)에 나타내었다.



식 (2),(3),(4)의 과정으로 요소가 분해되고, 암모니아 배출

과정에서 물은 큰 영향을 미치는 인자로 작용을 하는 것을 알 수 있다. 또한, Park 등[8]의 연구결과, 토양 수분함량이 약 19% 이상일 때부터 반응 초기에 암모니아 배출량이 급격하게 증가한다고 보고하였다. 또한 He 등[13]의 연구에서 대기 및 토양 기온은 암모니아 배출량에 직접적인 영향을 미치는 요인 중 하나라고 보고하였지만, 본 연구에서는 대기 및 토양 기온보다는 재배 기간 중 추가로 시비한 요소가 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 이상의 2년간 배추 재배지에서 암모니아 배출량을 이용하여 배추 재배 전 기간의 총 누적 암모니아 배출량을 산정하였다.

배추 재배지에서 요소 처리량에 따른 누적 암모니아 배출량을 분석한 결과, 요소 처리량이 증가함에 따라 암모니아 배출량도 유의적으로 증가하였다. 2020년에는 요소를 0, 160, 320 및 640 kg ha<sup>-1</sup>로 처리하였을 때 80일 동안의 누적 암모니아 배출량은 각각 0.9, 9.7, 39.3 및 75.3 kg ha<sup>-1</sup>이었다 (Fig. 2(A)). 요소 처리량이 증가할수록 암모니아 배출량이 정 상관관계로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이 결과를 통해서 2020년 배추 재배지에서 암모니아 배출계수를 산정한 결과 0.1217 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N kg N kg<sup>-1</sup>이었다.

2021년에는 2020년과 동일하게 요소를 0, 160, 320 및 640 kg ha<sup>-1</sup>로 처리하였을 때, 누적 암모니아 배출량은 각각 3.4, 13.5, 35.2 및 87.8 kg ha<sup>-1</sup>이었다. 2021년이 2020년에 비해서 누적 암모니아 배출량이 Urea 320 kg ha<sup>-1</sup>처리구를 제외한 모든 처리구에서 높는데, 토양온도, 기온 및 강수량 등 환경 요인들을 비교해 본 결과 다른 요인들은 2년간의 배추 재배기간 동안 거의 유사하였지만, 총 강수량은 2020년이 180.5 mm, 2021년이 243.5 mm으로 큰 차이를 보였다. 따라서, 2020년과 2021년의 누적 암모니아 배출량이 차이는 강수량이 큰 영향을 미쳤을 것이라고 판단된다. Park 등[8]의 연구에 의하면, 콩재배지 토양의 포트실함에서 온도조건과 수분조건별 암모니아 배출특성을 조사한 결과 온도에 의한 영향보다 강수량에 의한 영향이 크다고 보고한 바 있으며, 이는 본 연구결과와 일치하였다.

누적 암모니아 배출량은 재배기간 동안 환경 조건의 차이에 의해서 매우 유사하지는 않았지만, 요소 처리량이 증가함에 따라 누적 암모니아 배출량이 증가하는 경향은 동일하게 나타났다(Fig. 2(B)). 2021년의 배추 재배지에서 암모니아 배출계수는 0.1358 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N kg N kg<sup>-1</sup>이었으며, 2년동안 배추 재배지에서의 암모니아 배출계수를 평균한 결과 0.129 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N kg N kg<sup>-1</sup>이었다.

본 결과를 통해서 산출된 배추 재배지에서 암모니아 배출계수를 활용해서 질소비료의 시비에 따른 암모니아 배출량을 예측하여 향후 작물별 암모니아 저감기술을 개발하기 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 요소 처리 수준에 따른 배추 생육특성 및 토양특성 변화

요소 처리량에 따른 배추의 생육 특성은 Table 4에 나타내었다. 2020년에 배추 재배지에서 요소를 0, 160, 320 및 640 kg ha<sup>-1</sup>로 처리하였을 때 배추의 생체중은 27.1, 64.7,

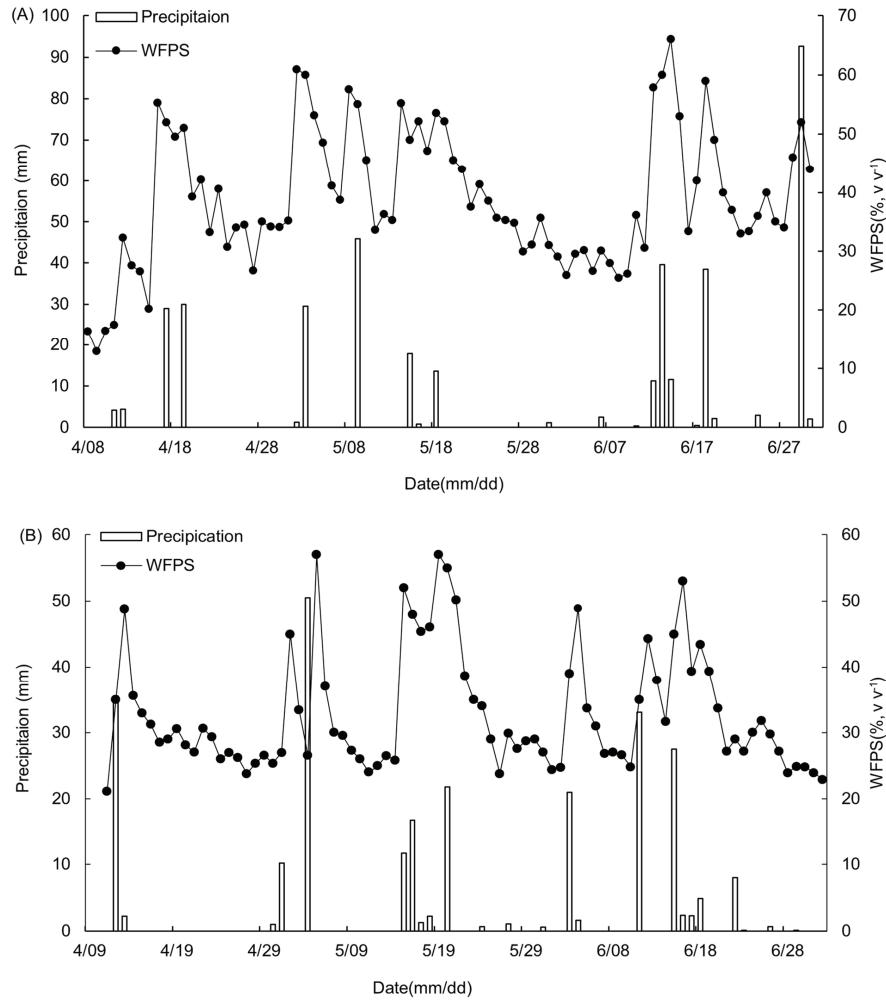


Fig. 3. Precipitation and water filled pore space(WFPS) during growing season of Chinese cabbage[(A) 2020 year, (B) 2021 year].

Table 4. Effect of urea application rates on growth of Chinese cabbage

Year	Treatment <sup>a)</sup>	Leaf No	Height	Width	Weight	Yield	Yield index
		No.	--- cm ---		g	Mg ha <sup>-1</sup>	
2020	Control	68.0±10.6d <sup>b)</sup>	27.0±5.0c	13.6±2.6c	1130.0±125.5d	27.1±22.4c	100
	Urea-0.5	75.0±9.8c	36.0±3.3b	18.9±2.5b	2698.0±176.1c	64.7±4.2b	239
	Urea-1	82.0±17.5b	36.6±2.1ab	20.5±1.4a	3913.0±854.9a	93.9±20.5a	346
	Urea-2	92.0±17.1a	37.1±2.5a	21.0±1.1a	4346.0±323.6a	104.3±7.8a	385
2021	Control	59.8±1.1c	29.6±3.8c	14.8±1.4c	1319.7±221.7c	39.6±6.7c	100
	Urea-0.5	76.9±4.7b	35.1±1.9b	20.2±1.1b	2468.5±242.6b	74.1±7.3b	187
	Urea-1	83.1±2.3ab	35.7±1.0ab	21.1±1.3a	3362.1±287.7a	100.9±8.6a	255
	Urea-2	87.8±5.6a	36.4±3.3a	21.1±1.9a	3509.9±355.8a	105.3±10.7a	266

a) Treatment; Control : Urea 0 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-0.5 : Urea 160 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-1 : Urea 320 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-2 : Urea 640 kg ha<sup>-1</sup>

b) The same letters are not significantly different (Duncan test, p<0.05).

93.9 및 104.3 Mg ha<sup>-1</sup>으로 요소의 시비량이 증가할수록 배추의 생체중도 증가하였다. 하지만, 배추 생체중 비율은 요소를 640 kg ha<sup>-1</sup> 시비하였을 때 요소 시비량이 증가한 만큼 비례적으로 증가하는 경향을 보이지 않았으며, 통계처리결과

에서도 이 Urea 340 kg ha<sup>-1</sup> 처리구와 차이가 없었다.

2021년의 배추 생육 역시 요소의 시비량이 증가함에 따라서 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 요소를 0, 160, 320 및 640 kg ha<sup>-1</sup>로 처리하였을 때 배추의 생체중은 39.6,

74.1, 100.9 및 105.3 Mg ha<sup>-1</sup>이었다. 또한, Urea 640 kg ha<sup>-1</sup> 처리구에서는 배추의 생체중이 요소 시비량의 증가를 고려해 볼 때 다른 처리구에 비해 낮았다. 이를 통해 농촌진흥청에서 제시한 배추의 요소 시비량인 320 kg ha<sup>-1</sup>가 최적 시비량임을 확인 할 수 있었다. Kwak 등[14]의 연구에서도 배추의 최적 질소 시비량 이상을 처리하였을 때는 배추 수량이 오히려 약 5.1% 감소하여 질소 시비수준의 증가에 따른 배추 수량이 일정 수준 이상일 경우 감소하는 경향이였다. 본 실험에서 역시 질소비료인 요소는 배추의 생육을 증대하기 위한 필수적인 성분이지만 과량 처리하였을 때는 그 효과가 감소하는 결과를 확인할 수 있었다.

따라서 배추 재배지에서 배추 수량을 최대로 하기 위한 요소의 최적 처리량은 320 kg ha<sup>-1</sup>이며, 배추의 수량을 증대하기 위해 과량의 요소 처리는 오히려 농업환경을 더 오염시키고, 배추의 수량을 감소시킬 수 있는 것으로 판단되었다. 또한 암모니아 배출량을 저감하기 위해 배추 재배지에서 요소의 최적 처리량을 활용하여 암모니아 배출량 저감기술을 개발할 필요가 있을 것으로 판단된다.

요소 처리량에 따른 배추의 무기성분 함량은 Table 5에 나타내었다. 2020년에 수확한 배추의 T-N 함량은 무처리(Control)의 경우 2.2%였고, 요소의 처리량이 160, 320 및 640 kg ha<sup>-1</sup>으로 증가함에 따라서 T-N 함량도 3.5, 4.3 및 4.9%로 증가하였다. T-N을 제외한 다른 무기성분 함량은 요소 처리량에 따라서 큰 차이를 나타내지 않았다. 2021년에 수확한 배추의 무기성분 함량도 2020년과 유사하게 무처리의 T-N 함량은 2.7%이었으며, 요소의 처리량이 증가함에 따라서 T-N 함량이 증가하여 Urea 640 kg ha<sup>-1</sup> 처리구에서는 4.5%이었다. T-N 이외의 무기성분 함량은 모든 처리구에서 큰 차이 없이 유사하였다.

요소 처리량에 따른 배추의 무기성분 흡수량은 Fig. 4와 같다. 2020년과 2021년 수확한 배추 모두 요소 처리량이 증가함에 따라서 수량이 증가하는 경향이였기 때문에 무기성분 흡수량 역시 요소 처리량이 증가함에 따라서 증가하였다. 또

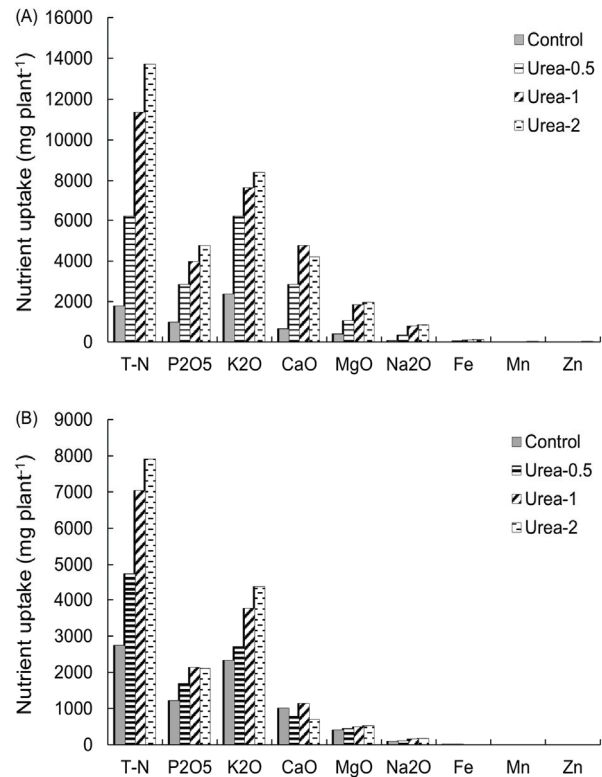


Fig. 4. Nutrient uptake of Chinese cabbage growth in field treated with different urea application rates.

한, 2021년에 비해 2020년 배추의 건중량이 비교적 높았기 때문에 무기성분 흡수량도 높았다.

배추 수확 후의 토양을 분석한 결과(Table 6), 요소 처리량이 증가함에 따라서 토양의 EC는 증가하는 경향이였으며, 총 질소의 함량도 유의적으로 증가하였다. 토양의 pH는 요소를 처리하였을 때 증가하는 경향이였지만, 요소 처리량에 따라서는 유의적인 변화를 보이지 않았다. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ca 및 Mg 함량은 비료를 처리한 경우가 무처리에 비해 높았다.

Table 5. Nutrient content of Chinese cabbage growth in field treated with different urea application rates

Treatment <sup>a)</sup>	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	Fe	Mn	Zn	
	%						mg kg <sup>-1</sup>			
2020	Control	2.2±0.4c <sup>b)</sup>	1.2±0.2a	2.9±0.4a	0.8±0.3b	0.5±0.1a	0.1±0.02a	339.9±44.7a	53.7±17.2b	74.8±11.9b
	Urea-0.5	3.5±0.4b	1.6±0.2a	3.5±0.5a	1.6±0.4a	0.6±0.1a	0.2±0.03a	299.0±39.4a	63.6±19.9b	72.4±15.0b
	Urea-1	4.3±0.3ab	1.5±0.2a	2.9±0.4a	1.8±0.4a	0.7±0.1a	0.3±0.1a	392.4±19.1a	79.0±18.5b	78.1±6.7b
	Urea-2	4.9±0.4a	1.7±0.3a	3.0±0.4a	1.5±0.4a	0.7±0.1a	0.3±0.1a	400.3±52.3a	130.5±22.6a	113.7±20.6a
2021	Control	2.7±0.2b	1.2±0.1a	2.3±0.1a	1.0±0.2a	0.4±0.1a	0.1±0.01a	265.5±42.1a	29.8±7.8a	34.4±4.5a
	Urea-0.5	4.2±0.3ab	1.5±0.1a	2.4±0.1a	0.7±0.1a	0.4±0.1a	0.1±0.02a	231.5±41.3a	29.8±4.7a	54.5±12.6a
	Urea-1	4.3±0.3ab	1.3±0.2a	2.3±0.1a	0.7±0.1a	0.3±0.1a	0.1±0.01a	82.3±11.6a	28.7±3.7a	48.4±8.5a
	Urea-2	4.5±0.3a	1.2±0.1a	2.5±0.7a	0.4±0.1a	0.3±0.1a	0.1±0.02a	62.6±6.9a	31.1±10.6a	42.9±7.8a

a) Treatment; Control : Urea 0 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-0.5 : Urea 160 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-1 : Urea 320 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-2 : Urea 640 kg ha<sup>-1</sup>  
 b) The same letters are not significantly different (Duncan test, p<0.05)

Table 6. Chemical characteristic in soil treated with different urea application rates

Treatment <sup>a)</sup>	pH	EC	O.M	T-N	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
	1:5	dS m <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>	
2020	Control	5.26±0.1b <sup>b)</sup>	0.21±0.02a	16.02±1.2a	0.95±0.02a	186.54±24.1b
	Urea-0.5	5.45±0.2a	0.24±0.01a	14.48±0.2a	0.85±0.01b	173.14±36.3b
	Urea-1	5.76±0.6a	0.22±0.02a	12.87±1.3a	0.91±0.01ab	192.65±37.1b
	Urea-2	5.60±0.3a	0.20±0.03a	16.42±0.4a	0.97±0.01a	213.59±28.6a
2021	Control	6.17±0.6b	0.22±0.01b	15.26±3.8a	0.87±0.01b	210.30±48.1b
	Urea-0.5	6.65±0.5a	0.73±0.4ab	14.31±3.0a	0.96±0.01a	255.94±41.5a
	Urea-1	7.19±0.7a	1.58±0.3a	10.13±6.8a	0.63±0.04c	256.78±83.4a
	Urea-2	6.67±0.9a	1.71±0.3a	13.38±4.7a	0.87±0.05b	203.07±96.3b

Treatment <sup>a)</sup>	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	
	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>			mg kg <sup>-1</sup>				
2020	Control	0.46±0.1a	4.31±0.3a	1.65±0.03a	0.07±0.001a	22.18±6.0a	27.75±1.0a	2.93±0.3a
	Urea-0.5	0.34±0.1a	5.78±1.2a	1.71±0.1a	0.07±0.002a	19.50±4.4a	22.56±2.4a	2.14±0.2a
	Urea-1	0.39±0.01a	5.30±1.6a	1.79±0.4a	0.08±0.01a	16.63±4.0a	22.59±6.2a	2.13±0.3a
	Urea-2	0.33±0.04a	5.06±0.7a	1.93±0.3a	0.06±0.002a	24.37±2.0a	22.88±4.7a	2.49±0.2a
2021	Control	0.49±0.1b	6.06±1.2a	1.87±0.3a	0.06±0.002a	28.34±5.4a	24.27±6.7a	2.58±0.4a
	Urea-0.5	1.14±0.4a	7.70±1.4a	1.92±0.3a	0.06±0.004a	28.23±4.7a	25.09±5.7a	2.47±0.4a
	Urea-1	1.29±0.3a	8.89±1.6a	2.11±0.2a	0.07±0.005a	22.70±9.8a	24.99±5.2a	2.67±0.5a
	Urea-2	0.99±0.6ab	7.38±1.9a	2.00±0.5a	0.07±0.005a	17.39±10.2a	29.44±6.5a	2.44±0.04a

a) Treatment; Control : Urea 0 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-0.5 : Urea 160 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-1 : Urea 320 kg ha<sup>-1</sup>, Urea-2 : Urea 640 kg ha<sup>-1</sup>  
b) The same letters are not significantly different (Duncan test, p<0.05)

### 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. G24014253042021)”.

### References

- Choi H, Hyun J, Kim Y, Yoo G (2019) Improvement of ammonia emission inventory estimation methodology for fertilizer application in the agricultural sector. *Journal of Climate Change Research*, 10(3), 237-242. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2019.10.3.237>.
- Shin DW, Ju HS, Seo EJ, Kim CY (2017) Management strategies to reduce PM-2.5 emission: emphasis-ammonia. *Korea Environment Institute*, 9, 3-6.
- Kim MS, Koo N, Kim JG (2020) A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study. *Korean Journal of Environmental Biology*, 38(1), 71-81. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.1.071>.
- Cao P, Lu C, Yu Z (2018) Historical nitrogen fertilizer use in agricultural ecosystems of the contiguous United States during 1850-2015: application rate, timing, and fertilizer types. *Earth System Science Data*, 10(2), 969-984. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.883585>.
- Kim MS, Koo N, Kim JG (2020) A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study. *Korean Journal of Environmental Biology*, 38, 71-81. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.1.071>.
- Hong SC, Kim JH, Kim MW (2021) Estimation of ammonia emission with compost application in plastic house for leafy perilla cultivation, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 40(4), 149-160. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.3.18>.
- Kim MW, Hong SC, Kim JH (2021) Evaluation of ammonia emission coefficient according to the use of



- compound fertilizers when cultivating apples and pears in orchards, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 40(4), 366-372. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.4.42>.
8. Park JH, Lee SL, Hwang SW, Eom JH, Kim SH, Kang SW, Cho JS, Seo DC (2020) Characteristics of ammonia gas emissions from soybean cultivation soils treated with mixed microorganisms. *Applied Biological Chemistry*, 63, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00503-3>.
  9. Choi H, Hyun J, Kim YJ, Yoo G (2019) Improvement of ammonia emission inventory estimation methodology for fertilizer application in the agricultural sector. *Journal of Climate Change Research*, 10(3), 237-242.
  10. Shan L, He Y, Chen J, Huang Q, Wang H (2015) Ammonia volatilization from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China. *Journal of Environmental Sciences*, 38, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.04.028>.
  11. Wang YS, Chang LC, Chang FJ (2020) Explore regional PM<sub>2.5</sub> features and compositions causing health effects in Taiwan. *Environmental Management*, 67(1), 176-191. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01391-5>.
  12. Bouwmeester RJB, Vlek PLG, Stumpe JM (1985) Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. *Soil Science Society of America Journal*, 49(2), 376-381. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900020021x>.
  13. He ZL, Alva AK, Calvert DV, Banks DJ (1999) Ammonia volatilization from different fertilizer sources and effects of temperature and soil pH. *Soil Science*, 164(10), 750-758.
  14. Kwak HK, Song YS, Hong CW (1997) Nitrogen recommendation based on soil nitrate treat for Chinese cabbage grown in plastic film house. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 30(1), 84-88.