

논 토양에서 암모니아 배출 특성 모니터링을 위한 수동식 암모니아 확산형 포집기 이용 사례 연구

김민석, 박민석¹, 민현기², 채은지², 현승훈², 김정규^{2,*}, 구남인³

고려대학교 오정리질리언스연구원, ¹고려대학교 생명자원연구소, ²고려대학교 환경생태공학부,

³국립산림과학원 산림육성복원연구과

A case study on monitoring the ambient ammonia concentration in paddy soil using a passive ammonia diffusive sampler

Min-Suk Kim, Minseok Park¹, Hyun-Gi Min², Eunji Chae², Seunghun Hyun², Jeong-Gyu Kim^{2,*} and Namin Koo³

OJEong Resilience Institute, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

¹Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

²Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

³Forest Resource Management and Restoration Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Republic of Korea

*Corresponding author

Jeong-Gyu Kim

Tel. 02-3290-3474

E-mail. lemonkim@korea.ac.kr

Received: 8 March 2021

Revised: 11 March 2021

Revision accepted: 12 March 2021

Abstract: Along with an increase in the frequency of high-concentration fine particulate matter in Korea, interest and research on ammonia (NH₃) are actively increasing. It is obvious that agriculture has contributed significantly to NH₃ emissions. However, studies on the long-term effect of fertilizer use on the ambient NH₃ concentration of agricultural land are insufficient. Therefore, in this study, NH₃ concentration in the atmosphere of agricultural land was monitored for 11 months using a passive sampler. The average ambient NH₃ concentration during the total study period was 2.02 μg m⁻³ and it was found that the effect of fertilizer application on the ambient NH₃ concentration was greatest in the month immediately following fertilizer application (highest ambient NH₃ concentration as 11.36 μg m⁻³). After that, it was expected that the NH₃ volatilization was promoted by increases in summer temperature and the concentration in the atmosphere was expected to increase. However, high NH₃ concentrations in the atmosphere were not observed due to strong rainfall that lasted for a long period. After that, the ambient NH₃ concentration gradually decreased through autumn and winter. In summary, when studying the contribution of fertilizer to the rate of domestic NH₃ emissions, it is necessary to look intensively for at least one month immediately after fertilizer application, and weather information such as precipitation and no-rain days should be considered in the field study.

Keywords: ammonia, chemical fertilizer, emission factor, passive diffusive sampler

서 론

초미세먼지 (fine particulate matter, PM-2.5)는 대기 중에서 직경 2.5 μm 이하의 입자로 정의되며, 인간 심혈관 및 호흡기관에 부정적인 영향을 미치고 대기 질 관리 및 정책에 있어 매우 중요한 요소이다 (Yeo and Kim 2001; Holt *et al.* 2015). 질소산화물 (NO_x), 황산화물 (SO_x), 그리고 암모니아 (NH_3)는 무기 PM-2.5의 주요 전구체로, 그중 NO_x 와 SO_x 의 배출량은 미국뿐만 아니라 국내에서도 지속해서 감소하고 있지만, NH_3 배출량은 유지 또는 증가하고 있어 그 관리 및 대책이 시급한 실정이다 (Holt *et al.* 2015; Shin *et al.* 2017; NCFDI 2021).

국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(III)에 따르면 국내 농업부문(대분류)의 암모니아 배출원은 크게 비료사용농경지와 분뇨관리, 두 개의 중분류로 구분된다 (NIER 2013). 비료사용농경지는 다시 요소, 복합비료, 황산암모늄, 기타(무수 암모니아, 암모니아수, 질소용액, 질산암모늄, 싸이오황산 암모늄, 기타 질소, 인산암모늄)로 구분되는 배출원 분류체계를 갖고 있다. 이 중 요소와 복합비료는 2008년 국립환경과학원에서 생산한 배출계수를 사용하고 있으며 (NIER 2008), 나머지 비료는 미국 환경청의 배출계수를 인용하고 있다 (USEPA 1994). 요소와 복합비료, 황산암모늄의 NH_3 배출계수는 각각 141.5, 75.2 그리고 97.0 kg ton^{-1} 으로, 지역별 비료 사용량 활동도로 하여 배출계수와 활동도를 곱하여 연간 배출량을 산정하고 있다. 요소와 복합비료의 배출계수는 현장에서 열린 체임버(wind tunnel chamber)를 활용해 실측자료를 근거로 산정되었으며, 단위면적 및 단위시간 당 배출량인 유량(flux) 측정을 활용하였다 (NIER 2008). 그러나 논과 밭이 구분되어 있지 않고, 농업활동 기간을 4월부터 10월까지로 가정하여, 남부지역에서 겨울에도 농업활동을 하는 경우 또는 하우스 등 시설 재배의 경우는 반영되지 못하고 있다.

토양으로 살포된 비료에서의 NH_3 휘발 및 대기로의 배출은 비료의 질소함량뿐만 아니라 토양의 특성(pH, 양이온치환능력, 점토함량, 투수 계수 등), 기상 조건(온도, 풍속, 강수), 그리고 농업활동(살포 방법, 경운) 등에 영향을 받는다 (Sommer and Hutchings 2001). 특히 토양 pH의 경우 질소의 거동에 즉각적인 영향을 미쳐 NH_3 휘발에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Kim *et al.* (2021)은 토양 pH가 4에서 7까지 증가함에 따라 살포 액비에서

NH_3 배출유량이 12.38 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 에서 137.35 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 까지 증가하는 것을 보고하였다. 또한 Kim *et al.* (2020b)은 액비 살포 직후 4주간의 연속 실험을 수행하였는데, 그 결과 NH_3 배출유량은 액비 살포 직후 1주 동안이 가장 높았으며 그 이후로는 급격하게 감소하였다. Choi *et al.* (2019)은 농경지 종류, 토양 pH, 기상 정보 등을 바탕으로 한 배출 보정계수 개발의 필요성을 역설하였다. 그러나 고도로 설계된 체임버를 이용하더라도 현장의 환경을 동일하게 모사하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 농경지 현장에서의 실측값을 토대로 한 연구결과와 영향 인자들의 영향력에 대한 평가 연구의 병행이 필수적이다. 이에, Park *et al.* (2014)은 요소 처리에 의한 NH_3 배출을 체임버를 이용하여 현장에서 평가하였으나 간헐적으로만 수행하여 모든 기간을 포함하지 못하였다. 최근 Park *et al.* (2020)은 공명 파장에서 NH_3 를 추적하고 레이저 조사 이후 감쇠곡선을 통해 1초 단위로 분석이 가능한 기기를 이용하여 2019년 5월부터 2020년 1월까지 대기 중 NH_3 농도를 관측하였으나, 도심의 건물 옥상에서 측정이 진행되어 농경지에서 발생하는 NH_3 를 직접적으로 확인하는 데에는 어려움이 따랐다.

이처럼 장기간 현장에서 대기 중 NH_3 의 농도를 실시간으로 관측하는 데에는 많은 인력과 경비를 필요로 하는 경우가 많으며 (Schjoerring *et al.* 1992), 그 대안으로 수동식 확산형 포집기를 활용한 방법이 있다. 수동식 확산형 포집기(passive diffusive sampler; PDS)는 확산과 관련한 Fick's law에 기반하여 채취기 내 충전액이 암모니아를 포집, 채취하고, 노출 시간을 고려하여 대기 중 암모니아 농도를 산정할 수 있는 장치로, 전기의 소모 없이 손쉽게 넓은 면적에 걸쳐 설치할 수 있는 것이 장점이다 (Rabaud *et al.* 2001; Puchalski *et al.* 2011). 미국의 National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network (NADP/NTN)은 30년 가까이 강우를 통한 암모늄(NH_4^+) 침적을 측정하고 있으며, 2007년부터는 2주 간격으로 대기 중 암모니아 농도를 PDS를 활용해 측정하고 있다 (Butler *et al.* 2016). 이를 통해 미국 전역에서 모든 계절에서 대기 중 NH_3 농도가 지속하여 증가하는 것을 보고하였다. 그 외에도 PDS를 수직으로 설치할 경우 NH_3 배출 유량의 분석 또한 가능한 것으로 알려져 있다 (Schjoerring *et al.* 1992). 이처럼 상대적으로 운용 및 관리가 간편하면서 현장의 기상 변동이 반영된 대기 중 NH_3 농도 관측이 가능한 PDS는 면형태의 비점오염원으로 배출되는 농경지에 적용하는 데에

매우 적합할 것으로 판단되나, 국내의 경우 PDS를 이용한 농경지 대기 중 NH₃ 농도 모니터링 연구는 찾아보기 힘든 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은, 수동식 확산형 포집기를 이용해 농경지 대기 중 NH₃ 농도를 모니터링하고 그 활용가능성을 제안하는 데에 있다.

재료 및 방법

1. 비 재배 및 토양분석

경기도 남양주시의 부설농장에서 1,400 m²의 논 토양을 대상으로 연구를 수행하였다 (37°35′00.8″N, 127°14′17.8″E) (Fig. 1). 2020년 4월 셋째 주에 경운을 한 후, 그로부터 2주 후 화학비료 투입과 담수 처리를 수행하였다. 복합 화학비료(N-P₂O₅-K₂O=21-17-17)를 이용하여 질소 투입량이 85 kg-N ha⁻¹이 되게끔 처리하였다. 그로부터 2주 후, 4주 동안 기른 벼(*Oryza sativa*)의 모종을 논에 심었으며(5월 셋째 주), 10월 넷째 주에 벼를 수확하였다. 벼의 재배 및 생육 관리는 농촌진흥청의 벼생력재배(표준영농교본-76)에 준하여 수행하였다(RDA 2000). 대상 논 토양의 pH는 6.26±0.46, 전기전도도는 0.08±0.05 ds m⁻¹, 유기물 함량은 1.54±0.28%, 양이온치환능력은 9.67±1.22 cmol kg⁻¹로 나타났으며, 토양 화학성 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법에 따라 수행하였다(NIAST 2000). 토양의 pH와 전기전도도는 토양과 증류수를 1:5(w/v) 비율로 교반 후 전극을 이용해 분석하였다(Thermo Orion 920A;

Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). 유기물함량은 Walkley-Black법으로 총유기탄소를 정량한 후 보정계수인 1.724를 곱하여 계산하였다(Seo *et al.* 2004). 양이온치환능력은 1N 초산암모늄 용액을 이용해 침출하여 양이온 농도를 유도결합플라즈마 분광기(Induced coupled plasma optical emission spectrometer, Agilent, Santa Clara, CA, USA)를 이용해 정량하고, 침출 여액의 pH를 측정하여 계산식을 이용해 산정하였다.

2. 대상 지역 기상 정보

연구 기간의 기상자료는 기상청에서 운영하는 인근 무인 자동기상관측장비(automatic weather station; AWS)의 방재 기상관측자료를 얻어 활용하였다. 경기도 남양주시의 기상관측자료에 따르면, 최근 20년간(2001~2020년) 연평균 강수량은 1,427mm로, 1년 누적 강수량의 64% 이상이 7월, 8월, 9월에 집중된 것으로 나타났다(Fig. 2). 국내 중부 지방의 연평균 강수량이 1,200~1,500 mm인 점을 고려해 볼 때 대상 농경지 지역의 특이점은 없었다. 다만, 최근 6년간(2014~2019년) 연평균 강수량이 783~1,354 mm로 그 이전 시기보다 강수량이 적었던 것이 특징이다. 특히 2019년의 강수량(984mm)과 비교해 볼 때 2020년에 1,696mm의 강수량이 1.7배 이상 증가하여 상대적으로 강수량이 대폭 증가한 것으로 나타났다. 대상 농경지에 PDS를 설치하고 실험을 수행한 기간의 일 평균기온 및 일 강수량을 확인하였다(Fig. 3). 그 결과 대상 실험 기간의 일 평균기온은 30°C를 초과하지 않았으며, 강수는 7~9월에 집중하였다.

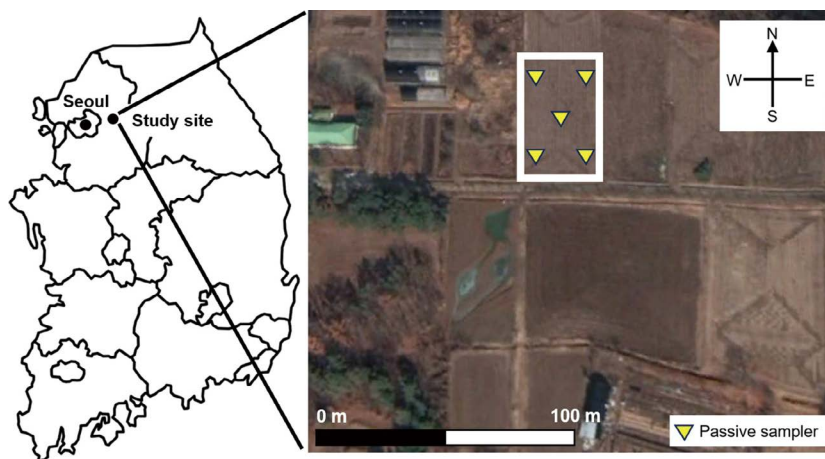


Fig. 1. Satellite view (Google Earth Pro, 2021) of the study site. The white solid line square and the yellow triangle indicate experimental paddy soil and the passive sampler position, respectively.

3. 수동식 암모니아 확산형 포집기 설치 및 NH₃ 농도 측정

복합비료의 처리 및 담수, 그리고 벽의 재배는 사각형의 제한된 면적에서만 수행하였으며, 그 안에서 총 5지점에 PDS를 배치하였다(Fig. 1). PDS 장착을 위하여 각 지점에 스테인리스 재질의 지지대를 설치하고, 강우는 막아주며 공기 흐름이 가능한 스테인리스 재질의 원형 보호처(shelter)를 지상으로부터 2 m 높이에 설치하였다. 연구에 널리 사용되고 있는 NH₃ 수동식 확산형 포집기로는 ALPHA, Ogawa, Radiello 등이 있으며, 본 연구에서는 미국 NADP/AMoN에서 사용하는 Radiello사의 제품을 사용하였다. 각 보호처에 스테인리스 재질의 cable tie를 이

용해 Radiello Vertical Adapter (RAD122)를 고정하였다. 그 후 Blue Diffusive Body (RAD1201) 안에 NH₃ 흡착 카트리지(RAD168)를 즉시 diffusive body 안에 넣은 후, diffusive body를 vertical adapter에 장착하였다.

현장에서 노출이 종료되어 수거된 카트리지는 보관 용기에 밀봉하여 실험실로 운반한 후 NH₃ 정량을 수행하였다. 카트리지 보관 용기에 증류수 10 mL 넣고 vortex를 이용해 20초간 교반하였다. 그 후 카트리지 보관 용기 내 용액 일정량과 완충용액(증류수 1 L에 NaOH 1.1 g, NaHCO₃ 3.04 g을 용해, pH 10.6), 페놀-니트로프루시드(phenol nitroprusside) 용액, 그리고 산화 용액(sodium hypochlorite in 0.2 M NaOH)을 이용해 인도-페놀 반응을 진행하였다. 발색 1시간 후 635 nm 파장에서 UV-VIS spectrometer를 이용해 흡광도를 분석하였다(Optizen POP, Mecasys Co. Ltd., Daejeon, Korea). 표준용액은 NH₄Cl을 이용해 조제하고 검량선을 작성하여 카트리지 내 NH₄⁺ 농도를 정량하였고, 그 후 다음의 계산식을 이용해 노출된 시간 동안의 대기 중 NH₃ 농도를 산정하였다.

$$C = 0.944 \times \frac{m}{235 \times t} \times 1,000,000$$

여기서 C 는 대기 중 NH₃ 농도($\mu\text{g m}^{-3}$), m 은 카트리지 내 NH₄⁺ 양(μg), t 는 카트리지의 노출 시간(분)을 의미한다(Puchalski *et al.* 2011). 경운을 시작한 2020년 4월 셋째 주부터 6월 첫째 주까지는 경운, 비료 투입, 모내기 작업이 NH₃ 휘발에 미칠 수 있는 영향을 세밀하게 관찰하기 위해 1주일 간격으로 카트리지를 교체하였으며, 그 이후 2021년 3월까지 4주 간격으로 카트리지를 교체, 대기 중

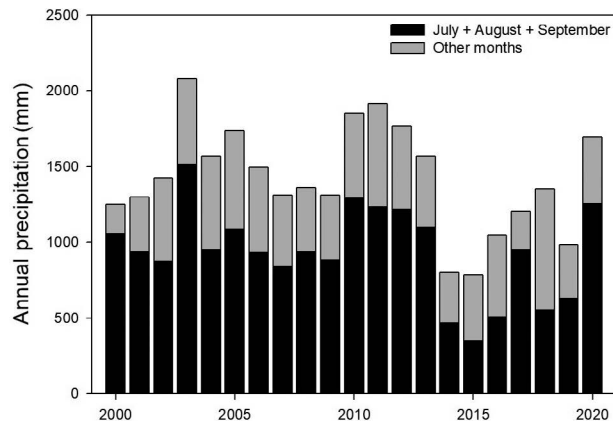


Fig. 2. Cumulative precipitation in the study site during 2000–2020. The black bar indicates the sum of the precipitation in July, August, and September. The gray bar indicates the sum of the precipitation for the rest of the month.

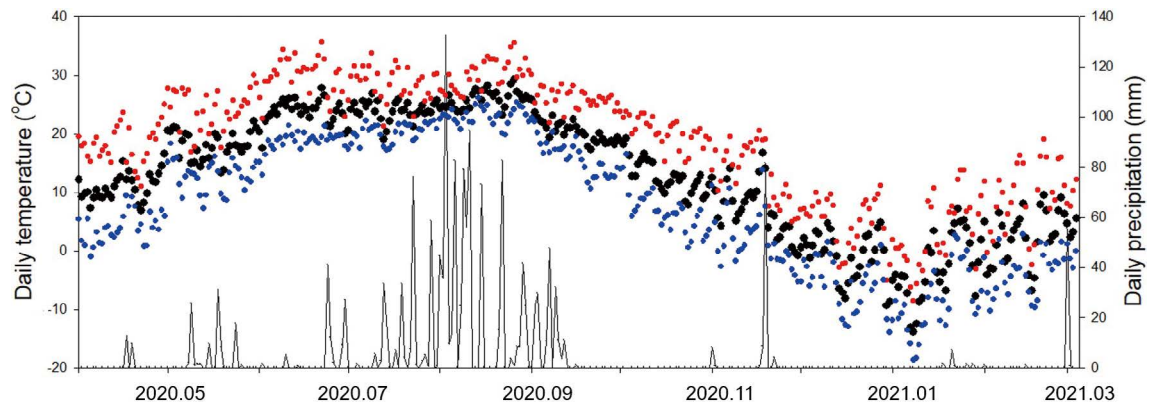


Fig. 3. Daily temperature (left y-axis) and daily precipitation (solid line, right y-axis) at the study site during April 2020–March 2021. The black, blue, and red dots indicate the average, lowest, and highest temperatures, respectively.

NH₃ 농도를 측정하였다. 주기마다 총 5개의 카트리지가 사용되었으며 이를 5 반복으로 하여 평균값을 결과로 나타내었다.

4. 통계분석

현장에서 관측된 수동식 포집기의 노출 기간별 대기 중 NH₃ 농도와 기상 자료 결과 사이의 상관관계를 분석하기 위해 Pearson's correlation coefficient를 산출하였다. 통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.4, USA)을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 대상 농경지의 2020년 기상 특성

2020년의 경우, 시베리아 이상고온현상과 정체전선의 활성화로 인하여 장마 기간이 길고 강수량이 많았던 것이 특징이다(Fig. 3) (KMA 2020). 일반적으로 5일 평균 6 mm day⁻¹ 이상 비가 내릴 때를 장마라 정의하는데(Wang 2001), 2020년의 장마 기간 중 강수량이 1973년 이후 역대 2위를 기록할 정도로 장마 기간에 강우가 집중하여 내렸다. 특히 중부지방의 경우 장마 기간이 6월 24일부터 8월 16일까지 54일로 1973년 이후 가장 길게 나타났으며, 전국강수일수는 28.3일로 역대 1위를 차지하였다(Moon *et al.* 2020).

2. 벼 재배 농경지에서의 대기 중 NH₃ 농도 변화

대상 농경지 위에 설치한 PDS를 통해 총 연구 기간의 대기 중 NH₃ 농도를 분석하였으며, 평균 NH₃ 농도는 2.02 µg m⁻³였다(Fig. 4). 경운 이후에는 2.36 µg m⁻³로 소폭 증가하였고, 비료 살포 및 답수 처리 직후 3.57 µg m⁻³까지 증가하였으며, 최고 11.36 µg m⁻³까지 지속해서 증가하였다. 그 후, 농도는 지속해서 감소하는 경향을 나타내어 벼를 수확한 이후 11월에 최저농도(0.48 µg m⁻³)가 나타났다. 그 후 실험 종료 시까지 평균 NH₃ 농도는 1.11 µg m⁻³로 나타났다. 대상 농경지 대기 중 NH₃ 농도는 비료 살포 이후 한 달간 높게 나타났으며 점차 감소하는 경향을 보여주었다. 논 토양과 같이 답수 처리된 환경에서는 수면과 대기 경계면에서 NH₄⁺의 NH₃로의 휘발로 배출되며(Sommer *et al.* 2004), Vlek and Craswell (1981)은 답수 중 NH₄⁺ 농도는 비료 살포 직후 1주일이 가장 높게 나타나는 것

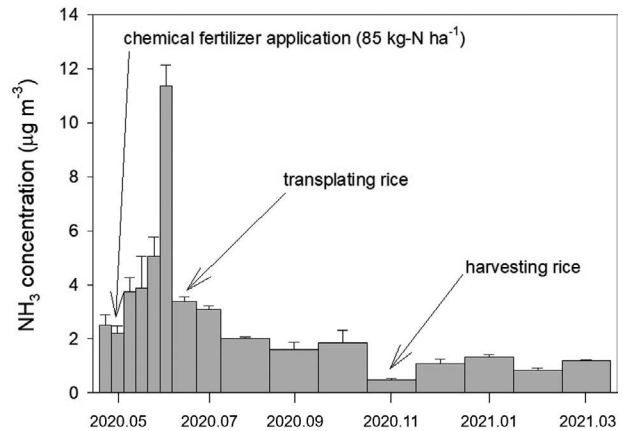


Fig. 4. Changes in the NH₃ concentration at the study site according to the rice cultivation system in paddy soil during April 2020–March 2021.

로 보고하였다. Hayashi *et al.* (2006)은 현장 논 토양에 요소 비료를 50 kg-N ha⁻¹로 처리하고 동적 체임버(dynamic chamber)를 이용해 휘발유량(volatilization flux)을 산정한 결과, 비료 처리 직후 NH₃ 휘발이 최대 45 g-N ha⁻¹ h⁻¹로 가장 높게 나타났다. Das *et al.* (2009)도 논 토양에 질소를 95.2 kg-N ha⁻¹로 처리하고 동적 체임버를 이용해 암모니아 유량(ammonia flux)을 평가하였는데, 비료 처리 3일 이후에 가장 높게 나타났으며 2주 후에는 비료 처리 이전 수준까지 감소하였다. Kim *et al.* (2020b) 역시 액비 살포 1주가 NH₃ 배출 유량(emission flux)이 가장 높은 것으로 보고하였다. 실험실에서의 체임버와 달리 현장에서는 일교차가 존재하며 강수의 변수도 존재한다. 따라서, NH₃가 휘발 및 대기로 배출되는 기간이 길어질 수 있으며, 본 실험에서도 비료 살포 후 한 달까지 NH₃ 휘발이 활발히 일어났다. 더하여, NH₃는 1 km 정도의 거리까지는 대기를 통한 이동이 가능하다(Butler *et al.* 2015). 따라서 대상 연구지 인근에 있는 다른 농경지, 가축사육시설, 농기계 및 농 작업자 활동 중에 발생된 NH₃의 영향으로 본 연구에서 비료 처리 후 대기 중 NH₃ 농도 증가가 선행 연구들보다 상대적으로 오랜 기간 나타난 것으로 판단된다.

3. 대기 중 NH₃ 농도와 기상과의 관계

대기 중 암모니아 농도는 계절 및 지리적 특성의 영향을 많이 받으며, 일반적으로 비료를 살포 후 기온이 높은 봄과 여름에 높게 나타난다(Puchalski *et al.* 2011). 그러나 본 연구의 결과, 여름철 NH₃ 농도는 높게 나타나지 않았다

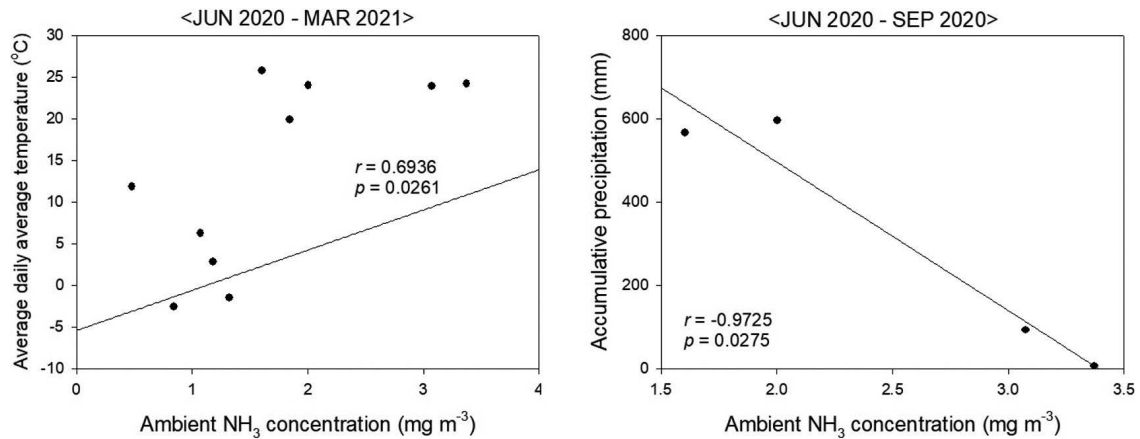


Fig. 5. Changes in NH_3 concentration at the study site according to the average daily temperature and precipitation. The correlation coefficient (r) was calculated through Pearson's correlation analysis.

(Fig. 4). 2020년 중부지방의 장마 기간 및 강수량이 1973년 이후 역대 2위를 기록할 정도로 긴 장마 기간 동안 많은 양의 강수가 있었다(Moon *et al.* 2020). 따라서 여름철 높지 않은 NH_3 농도는 여름철 집중 강우의 영향을 받은 것으로 판단된다(Fig. 3). 복합비료 투입에 따른 급격한 NH_3 휘발로 인한 대기 중 농도 증가 현상이 감소한 시점인 6월 이후부터, PDS 노출 기간별 NH_3 농도와 해당 기간의 기상자료 값과의 상관관계를 분석하여 Pearson 상관계수(r)와 p -value를 산출하였다(Fig. 5). 그 결과 대기 중 NH_3 농도와 개별 PDS 노출 기간에 따른 일일평균기온의 상관계수는 $r = 0.6936$ ($p < 0.05$)로 유의한 양의 상관계수를 보여주었다. 또한 기온이 미치는 영향을 상쇄하기 위해, 일일평균기온의 PDS 노출 기간 중 평균이 유사한 2020년 6월부터 9월까지($23.86^\circ\text{C} \sim 25.73^\circ\text{C}$)를 대상으로 노출 기간의 누적강수량과 대기 중 NH_3 농도의 상관관계를 분석하였고, 그 결과 높은 음의 상관계수($r = -0.9725$, $p < 0.05$)가 산출되었다. 즉, 기온이 유사한 경우, 강수량이 많을수록 대기 중 NH_3 농도는 감소하였다. 암모니아의 침적(deposition)은 크게 구름, 안개, 비, 눈 등에 의해 포집되어 침강하는 습성침적(wet deposition)과 가스상 및 입자상 물질의 직접적인 이동에 의한 건성침적(dry deposition)을 통해 진행된다(Asman *et al.* 1998; Andersen and Hovmand 1999; Kang 2001). Poor *et al.* (2001)은 4년간 질소 침적을 측정하였고, 그 결과 전체 침적의 56%가 습성침적에 의한 것이었으며, 전체 침적의 40%가 강우가 매우 많았던 여름철(6~8월)에 진행된 것을 보고하였다. 결국 NH_3 는 물에 대한 용해도가

높아 강우에 쉽게 녹아 지표로 강하, 침적되기 때문에, 강수량이 많을수록 습성침적으로 강하되는 NH_3 가 증가하여, PDS로의 흡착량 감소를 야기할 수 있다. 따라서 대상 연구지가 비료를 살포한 농경지임에도 불구하고, 전국강수일수 및 장마 기간이 이례적으로 길었던 2020년 여름에 NH_3 농도가 높게 나타나지 않았던 것으로 보인다. 다만 일일평균기온과 대기 중 NH_3 농도 사이의 상관관계 분석 시, 기간별 강수량의 차이(최소 0mm, 최대 595.5mm)가 영향을 미쳐 상대적으로 낮은 상관계수($r = 0.6936$)가 산출된 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 통계적으로 유의한 양의 관계($p = 0.0261$)로 나타났다. 이 결과는 PDS를 활용한 현장에서의 장기 모니터링에서도 암모니아 휘발과 기상과의 관계를 추정할 수 있음을 시사한다. 더하여, 대기 중 NH_3 농도의 모니터링에 있어 기온, 강수량뿐만 아니라 무강수일수 등에 대한 기상 정보를 함께 고려하여야 할 것이다. 또한, 농경지의 경우 농업활동(비료 살포) 및 작부체계(담수)가 매우 중요한 영향요인임을 인지하여야 한다.

적 요

국내 고농도의 초미세먼지 발생 빈도 증가와 함께 그 전구물질인 NH_3 와 관련한 연구가 활발히 진행 중이다. NH_3 배출에 있어 농업의 기여율이 높은 것은 자명한 사실이다. 그러나 비료 사용이 농경지 대기 중 NH_3 농도에 장기간 미치는 영향에 관련한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본

연구에서는 수동식 NH₃ 확산형 포집기를 활용해 11개월 간 농경지 대기 중 NH₃ 농도를 관측하였다. 그 결과 비료 살포 직후 한 달 동안 NH₃ 배출의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 그 이후 여름철 기온 상승으로 NH₃ 휘발이 촉진되어 대기 중 농도가 증가할 것으로 예상하였으나, 54일간의 지속적인 강우로 인하여 대기 중 높은 암모니아 농도는 관측되지 않았다. 그 후 NH₃ 농도는 가을과 겨울을 거치면서 점차 감소하였다. 비료의 영향력이 감쇠한 시점 이후에는 기온이 감소할수록, 그리고 강수량이 증가할수록 NH₃ 농도는 감소하는 것을 상관분석을 통해 확인할 수 있었다. 종합해 보면, 국내 NH₃ 배출량에서 비료의 기여율을 연구하는 데 있어 비료 살포 직후 최소 한 달 동안은 집중적으로 살펴보아야 할 것이며, 현장 연구 시 강수량과 무강우 일수 등의 기상 정보도 함께 고려해야 할 것이다.

사 사

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

REFERENCES

- Andersen HV and MF Hovmand. 1999. Review of dry deposition measurements of ammonia and nitric acid to forest. *For. Ecol. Manage.* 114:5-18.
- Asman WAH, MA Sutton and JK Schjörriing. 1998. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition. *New Phytol.* 139:27-48.
- Butler T, R Marino, D Schwede, R Howarth, J Sparks and K Sparks. 2015. Atmospheric ammonia measurements at low concentration sites in the northeastern USA: implications for total nitrogen deposition and comparison with CMAQ estimates. *Biogeochemistry* 122:191-210.
- Butler T, F Vermeylen, CM Lehmann, GE Likens and M Puchalski. 2016. Increasing ammonia concentration trends in large regions of the USA derived from the NADP/AMoN network. *Atmos. Environ.* 146:132-140.
- Choi H, J Hyun, YJ Kim and G Yoo. 2019. Improvement of ammonia emission inventory estimation methodology for fertilizer application in the agricultural sector. *J. Clim. Change Res.* 10:237-242.
- Das P, JH Sa, KH Kim and EC Jeon. 2009. Effect of fertilizer application on ammonia emission and concentration levels of ammonium, nitrate, and nitrite ions in a rice field. *Environ. Monit. Assess.* 154:275-282.
- Hayashi K, S Nishimura and K Yagi. 2006. Ammonia volatilization from the surface of a Japanese paddy field during rice cultivation. *Soil Sci. Plant Nutr.* 52:545-555.
- Holt J, NE Selin and S Solomon. 2015. Changes in inorganic fine particulate matter sensitivities to precursors due to large-scale US emissions reductions. *Environ. Sci. Technol.* 49:4834-4841.
- Kang HJ. 2001. Effects of nitrogen deposition on terrestrial ecosystems. *Korean J. Environ. Biol.* 19:232-238.
- Kim MS, N Koo and JG Kim. 2020a. A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study. *Korean J. Environ. Biol.* 38:71-81.
- Kim MS, N Koo, S Hyun and JG Kim. 2020b. Comparison of ammonia emission estimation between passive sampler and chamber system in paddy soil after fertilizer application. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17:6387.
- Kim MS, HG Min, N Koo and JG Kim. 2021. Response to ammonia emission flux to different pH conditions under biochar and liquid fertilizer application. *Agriculture* 11:136.
- KMA. 2020. Newsletter Climate Analysis Information. 2020-August. Korea Meteorological Administration. Seoul, Korea.
- Mun JJ, SU Gang and JJ Lee. 2020. National precipitation analysis of floods in 2020. *Water Future* 53:135-143.
- NCFDI. 2021. National Air Pollutants Emission Service. National Center for Fine Dust Information, National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea. https://airemiss.nier.go.kr/module/statistics/materialStatistics.do?siteId=airemiss&id=airemiss_030200000000 (accessed March 08, 2021).
- NIAS. 2000. Method of Soil and Plant Analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, Rural Development Administration. Suwon, Korea.
- NIER. 2008. Estimation of Ammonia Emission in Air and Establishment of Inventory (II). National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- NIER. 2013. National Air Pollutant Emission Estimation Manual (III). National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- Park JH, SH Park, YJ Seo, OH Kwon, SY Choi, SD Park and JE Kim. 2014. Effect of mixed treatment of urea fertilizer and zeolite on nitrous oxide and ammonia emission in upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:368-373.
- Park J, J Ryoo, J Jee and M Song. 2020. Origin and distribution of atmospheric ammonia in Jeonju during 2019-2020. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 36:262-274.

- Poor N, R Pribble and H Greening. Direct wet and dry deposition of ammonia, nitric acid, ammonium and nitrate to the Tampa Bay Estuary, FL, USA. *Atmos. Environ.* 35:3947–3955.
- Puchalski MA, ME Sather, JT Walker, CMB Lehmann, DA Gay, J Mathew and WP Robarge. 2011. Passive ammonia monitoring in the United States: Comparing three different sampling devices. *J. Environ. Monit.* 13:3156–3167.
- Rabaud NE, TA James, LL Ashbaugh and RG Flocchini. 2001. A passive sampler for the determination of airborne ammonia concentrations near large-scale animal facilities. *Environ. Sci. Technol.* 35:1190–1196.
- RDA. 2000. Rice Labour Cultivation. Rural Development Administration. Suwon, Korea.
- Schjoerring JK, SG Sommer and M Ferm. 1992. A simpler passive sampler for measuring ammonia emission in the field. *Water Air Soil Pollut.* 62:13–24.
- Seo MC, KH So, BG Ko and YK Son. 2004. Comparison of tyurin method and dry combustion method for carbon analysis in soils of low inorganic carbon content. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37:315–321.
- 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 and NJ Hutchings. 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction invited paper. *Eur. J. Agron.* 15:1–15.
- Sommer SG, JK Schjoerring and OT Denmead. 2004. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. *Adv. Agron.* 82:558–622.
- Vlek PL and ET Craswell. 1981. Ammonia volatilization from flooded soils. *Fert. Res.* 2:227–245.
- Wang B. 2002. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *J. Clim.* 15:386–398.
- Yeo GF and JH Kim. 2001. Particulate matter and spores of fungi imperfecti in the ambient air of Seosan in spring. *Korean J. Environ. Biol.* 19:153–157.