Effect of Reducing Ammonia Volatilization from the Arable Soil with Iron Sulfate

Seong Min Park¹, Sung Un Kim², and Chang Oh Hong^{3*}

¹Master's Degree, Department of Life Science and Environmental Biochemistry, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

²Research Professor, Life and Industry Convergence Research Institute, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

³Associate Professor, Department of Life Science and Environmental Biochemistry, Life and Industry Convergence Research Institute, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

*Corresponding author: soilchem@pusan.ac.kr

ABSTRACT

Received: October 29, 2020

Revised: November 11, 2020

Accepted: November 11, 2020

Ammonia (NH₃) reacts with nitric acid or sulfuric acid in the atmosphere and contributes to the formation of fine particulate matter. It is mainly produced by application of nitrogen fertilizer and livestock manure to the arable soil. Volatilization of NH₃ could decrease with application of acidic amendments such as iron sulfate (FeSO₄) through decreasing soil pH. This study was conducted to determine an optimum application rate of FeSO₄ to reduce NH₃ volatilization and maintain crop productivity in arable soil. Iron sulfate was applied at the rates of 0, 50, 100, and 200 kg Fe ha⁻¹. Cabbage (*Brassica rapa* L.) was planted on April 8th 2020 and harvested on June 10th 2020. The NH₃ gas was collected using static chamber (300 mm in length and 120 mm diameter) method. Cumulative NH₃-N volatilization decreased significantly with increasing application rate of FeSO₄. It decreased by ca. 21% at 200 kg Fe ha⁻¹ of FeSO₄. Soil pH decreased significantly with increasing application rate of FeSO₄. A decrease in cumulative NH₃-N volatilization with FeSO₄ was mainly attributed to decrease in soil pH. Cabbage yield did not decreased with increasing application rate of FeSO₄. The maximum cabbage yield was 7.10 Mg ha⁻¹ and cumulative NH₃-N volatilization decreased by 10.2% from 28.4 kg ha⁻¹ 63 days⁻¹ to 25.8 kg ha⁻¹ 63 days⁻¹ with 110 kg Fe ha⁻¹ of FeSO₄ application.

Keywords: Ammonium, Cabbage, Nitrogen, Soil pH, Upland soil

Cumulative NH₃-N volatilization from soils amended with different rates of FeSO₄

Introduction

2016년 국내 NH₃ 총 배출량은 301,301 톤으로 추정되고 있으며, 농업부문에서 237,017 톤 (78.7%)으로 가장 많이 배출되고 있다 (NIER, 2019). 특히 토양에 요소, 질산암모늄 등과 같은 질소질 비료를 시비할 때 다량의 NH₃가 휘산된다. 토양 내 암모늄 이온 (NH₄⁺)은 아래 식과 같이 수산화 이온 (OH⁻)과 반응하여 기체상체인 NH₃로 전환되고 다량의 NH₃가 대기 중으로 휘산된다.

암모니아 휘산은 질소 손실이라는 경제적 손실뿐만 아니라 자연환경에 미치는 부정적인 영향도 가지고 있다. 일반적으로 대기 중 암모니아 (NH₃) 농도는 1 - 20 ppb로 매우 낮지만 대기화학, 자연생태계의 산성화, 생물상의 다양성 변화에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Gundersen and Rasmussen, 1990; Bobbink et al., 1992; Asman, 1994).

특히, 암모니아 (NH₃)는 대기 중에서 황산화물이나 질소산화물 등과 반응하여 황산암모늄 (NH₄SO₄)이나 질산암모늄 (NH₄NO₃) 등의 형태인 2차 미세먼지 (PM_{2.5}, Secondary particulate matter)를 생성하며 미세먼지의 전구물질로서 작용한다 (Anderson, 2003). PM_{2.5}는 지름이 2.5 μm 이하의 미세한 입자를 뜻하며 일반 먼지와는 다르게 코와 기관지에서 걸러지지 않고 체내 축적되어 호흡을 통해 기관지, 폐에 직접적으로 영향을 끼친다 (Pope and Dockery, 2006). 또한 호흡 과정에서 혈액으로 들어가 뇌졸중, 심장마비 등의 여러 문제를 야기하고 당뇨병 등 다른 질환에도 영향을 끼친다.

일반적으로 NH₃는 토양 내 pH가 높아지면 OH⁻가 NH₄⁺과 반응하며 NH₃의 형태로의 전환이 빠르게 이루어진다 (Kim et al., 2020; Lee et al., 2020). 특히, 토양의 pH가 7.0 이상일 때 NH₄⁺이 NH₃로 전환되어 대기 중으로 손실될 수 있는 적정 조건이라고 알려져 있다 (Hillel and Hatfield, 2005). 따라서 토양의 pH를 낮춤으로써 NH₃의 휘산량을 저감시킬 수 있다.

토양의 pH를 낮추기 위해 황산철 (FeSO₄)과 황산알루미늄 [Al₂(SO₄)₃] 등을 이용할 수 있다. 그러나, Al₂(SO₄)₃은 알루미늄을 포함하고 있어 농경지 토양에 과량으로 사용 시 알루미늄 독성에 의한 작물의 생육 저하를 야기할 수 있다. FeSO₄는 토양의 pH를 저감시킬 뿐만 아니라 작물의 다량 필수원소인 황 (S)과 미량 필수원소인 철 (Fe)을 동시에 함유하고 있어 작물의 생육에 이로울 수 있다. 다만 Fe은 미량 필수원소인 반면에 작물이 과량으로 흡수 시 독성을 야기할 수 있어 농경지 토양에서는 적정량으로 사용하여야 한다. 이전 연구에 따르면, 계사에서 사용되는 짚에 FeSO₄·7H₂O를 100과 200 g kg⁻¹의 수준으로 처리했을 때 짚의 pH를 감소시킴으로써 발생된 누적 암모니아가 각각 11과 58%만큼 감소하였다고 보고하였다 (Moore, 1995). 하지만 FeSO₄를 농경지 토양에 처리했을 때 발생하는 암모니아의 저감 효과 및 작물의 수량에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 토양의 pH를 저감시킬 수 있는 제재인 FeSO₄가 PM_{2.5}의 원인 물질인 NH₃의 휘산 및 작물의 생산성에 미치는 영향을 조사하여 적정 사용량을 산정하기 위해 실시되었다.

Materials and Methods

공시토양 본 연구를 수행하기 위해 경남 밀양시 부북면 오례리에 소재하는 부산대학교 부속농장 (35°30'08.1"N,

Table 1. Selected chemical properties of the studied soil before the test ($n = 3$).

Item	Mean	SD
pH (1:5, H ₂ O)	7.2	0.04
Electrical conductivity (1:5, dS m ⁻¹)	0.43	0.01
Organic matter (g kg ⁻¹)	18.3	0.57
Total nitrogen (g kg ⁻¹)	0.90	0.02
Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	172	1.05
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	6.15	0.23
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	2.35	0.14
Exchangeable cations (cmol _c kg ⁻¹)		
K	0.55	0.01
Ca	4.95	0.38
Mg	0.91	0.07
Na	0.63	0.01

SD: Standard deviation.

128°43'18.2"E)의 밭토양을 공시토양으로 선정하였다. 시험포장의 토양은 용지통 (Fine loamy, mixed, mesic family of Typic Paleudults with 7 - 15% slope, moderately well drained)으로 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 42.5%, 44.7%, 12.8%로 토성은 양토였다. 시험 토양의 pH는 7.2이었으며 총 질소 함량과 암모늄태 질소의 함량은 각각 0.90 g kg⁻¹과 6.15 mg kg⁻¹이었다. 자세한 공시토양의 화학적 특성은 Table 1에 나타냈다.

시험포장 및 재배관리 밭토양에서 제재 처리에 따른 NH₃ 휘산량과 토양 특성 및 작물수량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2020년 4월 8일에 배추 (*Brassica rapa* L.) 모종을 65 cm × 40 cm 간격으로 정식하여 6월 10일에 수확하였다.

FeSO₄ 사용에 따른 NH₃ 휘산량 저감 효과를 조사하기 위하여 FeSO₄·7H₂O를 0, 50, 100, 200 kg Fe ha⁻¹로 사용하였다. 모든 처리구에 N-P₂O₅-K₂O (113-78-79 kg ha⁻¹)를 기비로 4월 7일에 시비하였으며 추비로 4월 21일, 5월 6일, 5월 20일에 각각 60-0-26, 73-0-66, 73-0-26 kg ha⁻¹를 시비하였다. 각 처리구의 크기는 2.3 × 2.4 m (5.52 m²)이었으며 난괴법 (Randomized complete block design)에 따라 3반복하여 배치하였다.

암모니아 가스 시료채취 및 분석 밭토양에서 발생하는 NH₃ 가스를 측정하기 위해서 static chamber 법 (Nõmmik, 1973)을 모방하여 실험에 적용시켰다. 면적이 0.01 m²인 챔버를 각 처리구의 두둑 정 중앙에 5 cm 깊이로 설치하였고 주 5회 NH₃ 가스 시료를 채취하였고 수확 후에는 주 1회 가스 시료를 채취하였다. 재배기간 동안에는 챔버 안에 식물체가 자라지 않게 하였다. 챔버 내에는 2 cm 두께의 스펀지 2개가 설치되어 있다. 위쪽에 위치한 스펀지는 대기 중에 존재하는 NH₃ 가스가 챔버 내부로 들어오지 못하게 막는 것이고 아래쪽에 위치한 스펀지가 토양으로부터 발생하는 NH₃ 가스를 포집하는 역할을 한다. 두 개의 스펀지 모두 60 ml의 glycerol (4%) + H₃PO₄ (1M) 혼합용액으로 충분히 적신 후 비닐백에 보관하여 사용하였다. 가스 시료채취 시 사용된 스펀지는 모두 새 것으로 교체하였고 아래쪽 스펀지는 150 ml의 2 M KCl 용액이 담긴 플라스틱 밀폐 용기에 완전히 담근 후 실험실로 옮겨졌다. 침출용액 중에 존재하는 NH₄⁺은 Indophenol blue 비색법 (Searle, 1984)을 통해 UV/VIS Spectrophotometer를 이용하여 667 nm의 파장에서 측정하였고 이를 이용하여 NH₃-N의 휘산량을 계산하였다.

토양 이화학적 특성 및 배추 수량 조사 토성은 비중계법으로 분석하여 미국농무성법 분류기준으로 분류하였다. 제재 투입에 따른 토양 화학성 변화를 알아보기 위해 시험 전 토양과 배추 수확 후 토양을 Auger를 이용하여 채취한 후 분석에 이용하였다. pH 및 전기전도도 (Electrical conductivity, EC)는 1:5 (토양: 물) 비율로 30분간 교반하여 pH meter (Orion Star A215, Thermo Fisher Scientific, USA)로 측정하였다. 총 질소 함량은 Kjeldahl법을, 유기물 함량은 Wakley and Black법 (Nelson and Sommers, 1996)을 이용하여 분석하였다. 유효인산 함량은 Lancaster method (RDA, 1988)을 이용하여 UV-VIS Spectrophotometer로 흡광도를 측정하여 분석하였다. 치환성 양이온은 1 M NH_4OAc (pH 7.0)로 침출하여 atomic absorption spectrometer (AA-7000, Shimadzu, Japan)로 측정하였다. 토양 내 무기태 질소의 함량은 토양 건조시료 5 g과 25 ml의 2 M KCl 용액을 30분 동안 진탕한 후 Whatman No. 2로 여과하여 침출액을 실험에 이용하였다. 암모늄태 질소 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)는 UV-VIS Spectrophotometer로 667 nm의 파장에서 농도를 측정하는 indophenol blue 비색법 (Searle, 1984)으로 분석하였고 질산태 질소 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)는 brucine 법 (Wolf, 1944)으로 분석하였다.

수확한 배추는 드라이 오븐을 이용하여 70°C에서 72시간 이상 건조시킨 후 건물중을 측정하였다.

통계분석 수확 후 토양의 NH_3 누적 배출량, pH, NH_4^+ 함량의 통계 분석을 위해 Statistix 통계 프로그램 (version 9.0, Analytical Software, Tallahassee, USA)을 이용하였다. 처리구간 차이를 비교하기 위하여 조사된 자료는 ANOVA 검증을 통하여 분석하였다. F-test 결과 값이 $p < 0.05$ 의 범위에서 유의한 경우에만 최소유의차 검정 (Least significant difference)을 실시하였다.

Results and Discussion

암모니아 휘산 배추의 재배기간 동안 NH_3 의 일일 배출량의 경향은 전반기에 대부분의 NH_3 가 발생하였으며 후반기에는 발생량이 적게 나타났다 (Fig. 1a). NH_3 의 일일 배출량 변화와 대기 및 토양온도와의 관계를 파악하기 위해 배추의 재배기간 동안 일일 대기 및 토양온도를 조사하였으나 NH_3 의 일일 배출량과 대기 및 토양온도와의 밀접한 관계는 나타나지 않았다. 일반적으로 토양의 온도가 증가할수록 NH_3 의 발생량이 증가한다. He (1999)은 토양의 온도가 5°C에서 25°C, 25°C에서 45°C로 증가할 때 NH_3 최대 배출량이 각각 2배, 3.4배 증가한다고 보고하였다. 배추를 정식한 4월 8일부터 5월 2일까지 일일 평균 대기 및 토양온도는 각각 17.2°C와 18.5°C로 상대적으로 낮게 유지되었으나 5월 3일 이후 대기 및 토양온도는 점차 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 1b). 그러나 배추재배 기간 동안 일일 NH_3 의 배출량은 상대적으로 온도가 낮게 유지되었던 4월에 상대적으로 높게 나타났다.

배추의 재배기간 동안 일일 NH_3 의 배출량 변화와 토양수분과의 관계를 파악하기 위해 일일 강수량 및 토양 공극 내 수분이 차지하는 비율 (water filled pore space, WFPS)를 조사하였다 (Fig. 1c). 배추 재배기간 동안 일일 NH_3 배출량의 피크는 4월 16일, 4월 27일, 5월 12일, 5월 24일 총 4회에 걸쳐 나타났다. 일일 강수량 및 WFPS가 상대적으로 높았던 시기는 4월 17일, 5월 7일, 6월 14일로 조사되어 일일 NH_3 배출량의 급격한 증가와 토양수분함량과는 큰 관련성이 없는 것으로 나타났다. WFPS가 47% 정도에서는 요소의 분해가 빠르게 일어나면서 NH_3 의 휘산이 잘 일어나지만, WFPS가 59% 이상인 조건에서 토양의 대공극 내 수분의 함량이 많아지면서 오히려 NH_3 의 휘산이 방해된다 (Pelster, 2019). 그러나 본 연구에서 일일 NH_3 의 배출량이 상대적으로 높게 나타났던 4월 16일부터 4월 29일 사이의 평균 WFPS는 60%로 높게 나타났다. 따라서 본 연구에서 배추 재배 기간 동안 일일 NH_3 배출량 변화는 온도와 토양수분

과 같은 기후인자 보다는 배추 재배기간 동안 사용된 요소비료에 영향을 받은 것으로 판단된다. 요소비료는 기비로 4월 7일, 추비로 4월 21일, 5월 6일, 5월 20일에 사용되었으며 일일 NH_3 배출량의 피크는 질소비료가 사용된 후 몇일 뒤 4월 16일, 4월 26일, 5월 12일, 5월 24일에 발생했다 (Fig. 1a). 일반적으로 농경지 토양에 요소비료가 사용된 후 약 7일 후에 NH_3 가 급격하게 발생한다 (Jantalia, 2012). 본 연구에서 기비와 추비 시 다소 차이는 있었지만 요소비료 사용 후 4-9일 사이에 NH_3 가 급격하게 발생했으므로 조사되었다. 요소비료는 기비로 4월 7일 113 kg N ha^{-1} 로 사용되었으며, 추비로 4월 21일, 5월 6일, 5월 20일에 60, 73, 73 kg N ha^{-1} 로 각각 사용되었다. 따라서 상대적으로 많은 양의 요소가 사용된 4월 7일과 4월 16일 이후에 일일 NH_3 의 배출량이 급격하게 증가한 것으로 조사되었다.

Fig. 1. $\text{NH}_3\text{-N}$ flux from soils amended with different rates of FeSO_4 during experiment (a) (Error bars represent the standard deviation of triplicate), daily air and soil temperatures (b), and precipitation and water filled pore space (WFPS) (c) during growing season of cabbage.

배추 재배기간 총 63일간 누적 NH_3 배출량은 FeSO_4 의 사용량을 증가시킴에 따라 유의하게 감소하는 경향을 나타냈다 (Fig. 2). FeSO_4 를 50 kg ha^{-1} 로 사용하였을 때 NH_3 의 누적배출량은 무처리에 비해 유의하게 감소되지 않았으나 사용량을 100과 200 kg ha^{-1} 로 증가시켰을 때 유의하게 감소하였다. 또한 FeSO_4 를 200 kg ha^{-1} 로 사용하였을 때 무처리에 비해 NH_3 의 누적배출량을 약 21%까지 저감 시키는 효과를 나타냈다. Moore (1996)은 돈분 슬러리에 FeSO_4 를 13 g kg^{-1} 과 26 g kg^{-1} 을 투입하였을 때 무처리에 비해 NH_3 배출량을 각각 53%와 77% 감소시켰다고 보고하였다.

토양특성 변화 배추 수확 후 토양의 pH는 FeSO_4 의 사용량을 증가시킴에 따라 감소하는 결과를 나타냈다 (Table 2). 토양에 FeSO_4 를 사용하게 되면 아래의 반응식에 의해 Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 로 산화되면서 최종적으로 2몰의 H^+ 를 생성하여 토양의 pH는 낮아지게 된다 (Xenidis, 2010).

Warren and Alloway (2003)의 연구결과에 따르면 토양에 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 를 0, 0.22, 0.54, 1.09% ($w w^{-1}$) 수준으로 처리하였을 때 토양의 pH가 6.9에서 각각 5.28, 3.96, 3.17로 감소하였다. 본 연구에서 FeSO_4 를 200 kg ha^{-1} 까지 사용하

Fig. 2. Cumulative $\text{NH}_3\text{-N}$ volatilization from soils amended with different rates of FeSO_4 for 63 days. Different lower case letter denotes a significant difference at $p < 0.05$.

Table 2. Change of pH of soils amended with different rates of FeSO_4 after harvest time.

Application rate (kg Fe ha^{-1})	pH (1:5, H_2O)	SD
0	7.26a	0.01
50	7.12a	0.06
100	6.97ab	0.07
200	6.57b	0.11

Different lower case letter denotes a significant difference at $p < 0.05$.

SD: Standard deviation.

였을 때 토양의 pH는 7.26에서 6.57로 약 0.69 정도 감소되는 효과를 나타냈다. Warren and Alloway의 연구에서 보다 토양의 pH 감소효과가 낮았던 이유는 본 연구에서 FeSO_4 200 kg ha⁻¹을 중량비로 환산하면 약 0.01% (w w⁻¹)로 Warren and Alloway의 연구에서 처리된 양 보다 낮았기 때문으로 판단된다.

토양의 pH가 낮아지게 되면 아래의 반응식과 같이 NH_4^+ 이 OH^- 과 반응하여 기체상태인 NH_3 로 전환되어지는 과정이 저해되어 NH_3 의 누적배출량이 저감하게 된다.

이러한 주장은 FeSO_4 시용량에 따른 배추 수확 후 토양 내 NH_4^+ 함량 변화에 의해 입증된다. 배추 수확 후 토양 내 NH_4^+ 함량은 FeSO_4 의 시용량을 증가시킴에 따라 증가하는 결과를 보였다 (Table 3).

배추 재배 기간 동안 누적 NH_3 배출량은 수확 후 토양의 pH 변화와 유의한 정의 상관관계 ($r = 0.676^*$)를 나타냈다 (Fig. 3a). 또한 배추 수확 후 토양의 pH 변화와 토양 내 NH_4^+ 함량은 유의한 부의 상관관계 ($r = 0.663^*$)를 나타냈다 (Fig. 3b). 즉, 이상의 결과들을 바탕으로 볼 때 FeSO_4 의 시용량을 증가시킴에 따라 토양의 pH는 감소하였으며 토양의 pH가 감소함에 따라 NH_4^+ 가 NH_3 로 전환되는 과정이 저해되었으며 토양 내 NH_4^+ 의 함량은 증가하였다. 이러한 반응의 결과로 인하여 FeSO_4 의 시용량을 증가시킴에 따라 배추 재배 기간동안 NH_3 의 누적배출량은 감소하는 결과를 나타냈다.

Fig. 3. Relationships between soil pH and cumulative NH_3 -N volatilization (a) and NH_4^+ concentration in soil (b) at harvest time.

Table 3. Change of NH_4^+ in soils amended with different rates of FeSO_4 after harvest time

Application rate (kg Fe ha ⁻¹)	NH_4^+ (mg kg ⁻¹)	SD
0	4.21b	0.30
50	4.58b	0.53
100	5.29ab	0.24
200	6.23a	0.22

Different lower case letter denotes a significant difference at $p < 0.05$.

SD: Standard deviation.

Fig. 4. Cabbage yield response to application rates of FeSO_4 (Error bars represent the standard deviation of triplicate. NS: not significant).

배추 수량 FeSO_4 의 사용량에 따른 수확 후 배추의 건물수량은 Fig. 4에 나타났다. 배추의 수량은 FeSO_4 사용량 간에 통계적으로 유의한 차이는 없었으나 FeSO_4 의 사용량을 100 kg ha^{-1} 까지 증가시킴에 따라 증가하는 경향을 보이다가 200 kg ha^{-1} 로 사용량을 증가시켰을 때 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 유사한 연구결과가 Fu (2013)에 의해 보고되었으며 해당 연구결과에 따르면 FeSO_4 를 0, 3, 6, 9, 12 g kg^{-1} 의 수준으로 처리했을 때 차나무의 건물수량이 무처리구에 비해 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 수량 반응식을 이용하여 배추의 수량은 FeSO_4 의 사용량 (FS)과 다음과 같은 관계가 있었다.

$$\text{배추의 수량} = 5.74 + 0.025 \text{ FS} - 0.001 \text{ FS}^2 \text{ (model } R^2 = 0.821^{***}) \quad (\text{Eq. 5})$$

수량반응식을 이용하여 배추의 최고수량을 산정하여 본 결과, FeSO_4 를 110 kg ha^{-1} 로 사용 시 배추의 수량은 7.10 Mg ha^{-1} 로 나타났다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 배추 재배기간 동안 누적 NH_3 배출량은 FeSO_4 의 사용량 (FS)과 다음과 같은 관계가 있었다.

$$\text{배추 재배기간 동안 } \text{NH}_3 \text{ 누적 배출량} = 29.3 - 0.316 \text{ FS (model } r = 0.963^*) \quad (\text{Eq. 6})$$

위의 관계식을 이용하여 배추의 최고수량을 얻었던 FeSO_4 의 사용량인 110 kg ha^{-1} 로 사용 시 NH_3 누적 배출량은 $25.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ 63 days}^{-1}$ 으로 무처리에 비해 10.2% 저감되는 효과를 나타냈다. 따라서 FeSO_4 를 적정량으로 사용하면 $\text{PM}_{2.5}$ 의 원인물질인 NH_3 의 발생량을 저감하면서 작물의 생산성을 보장할 수 있을 것으로 판단된다.

Conclusions

본 연구에서 NH_3 의 휘산은 온도와 강수량과 같은 기상인자 보다는 질소비료의 사용과 관련성이 더 높은 것으로 조사되었다. FeSO_4 는 토양의 pH를 저감시켜 NH_4^+ 가 NH_3 로 휘산되는 과정을 저해하여 배추 재배기간 동안 NH_3 의 누

적배출량을 저감시키는 효과를 나타냈다. 또한 FeSO_4 의 사용량 증가에 따른 배추의 수량 감소는 발생하지 않았다. FeSO_4 를 110 kg ha^{-1} 로 사용 시 배추의 최대수량을 얻었을 수 있었으며 배추 재배기간 동안 NH_3 누적배출량을 10.2% 감소시키는 효과를 얻었을 수 있었다. 따라서 FeSO_4 는 밭토양에 적정량으로 사용된다면 $\text{PM}_{2.5}$ 의 원인물질인 NH_3 의 발생량을 저감하면서 작물의 생산성을 보장할 수 있는 좋은 토양개량제로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ01425301)”, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Anderson, N., R. Strader, and C. Davidson. 2003. Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and other sources. *Environment International*. 29(2-3):277-286.
- Asman, W.A. 1994. Emission and deposition of ammonia and ammonium. *Nova Acta Leopoldina NF*. 70(288):263-297.
- Bobbink, R., G.W. Heil, and M.B. Raessen. 1992. Atmospheric deposition and canopy exchange processes in heathland ecosystems. *Environmental pollution*. 75(1):29-37.
- Du Plessis, M.C.F., and W. Kroontje. 1964. The relationship between pH and ammonia equilibria in soil. *Soil Science Society of America Journal*. 28(6):751-754.
- Fu, D., Y. Wang, and Z. Ding. 2013. Effects of ferrous sulfate with sulfuric acid on tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz) soil environment. *Soil Science and Plant Nutrition*. 59(5):783-789.
- Gundersen, P., and L. Rasmussen. 1990. Nitrification in forest soils: effects from nitrogen deposition on soil acidification and aluminum release. p 1-45. In: *Reviews of environmental contamination and toxicology*. Springer, NY, USA.
- He, Z.L., A.K. Alva, D.V. Calvert, and D.J. Banks. 1999. Ammonia volatilization from different fertilizer sources and effects of temperature and soil pH. *Soil Science*. 164(10):750-758.
- Hillel, D., and J.L. Hatfield, (Eds.). 2005. *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Vol. 3). Amsterdam: Elsevier. 56-64. NY, USA.
- Jantalia, C.P., A.D. Halvorson, R.F. Follett, B.J. Rodrigues Alves, J.C. Polidoro, and S. Urquiaga. 2012. Nitrogen source effects on ammonia volatilization as measured with semi-static chambers. *Agronomy Journal*. 104(6): 1595-1603.
- Kim, D.H., Y.J. Kang, J.J. Choi, and S.I. Yun. 2020. Lettuce growth and nitrogen loss in soil treated with corn starch carbamate produced using urea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 53(1):13-21.
- Lee, S., E. Kim, M. Lee, J. Wi, and H. Ahn. 2020. Pilot scale solid state anaerobic co-digestion of dairy manure and milking parlor wastewater. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 53(2):186-199.
- Moore Jr, P.A., T.C. Daniel, D.R. Edwards, and D.M. Miller. 1995. Effect of chemical amendments on ammonia volatilization from poultry litter. *Journal of Environmental Quality*. 24(2):293-300.
- Moore Jr, P.A., T.C. Daniel, D.R. Edwards, and D.M. Miller. 1996. Evaluation of chemical amendments to reduce ammonia volatilization from poultry litter. *Poultry Science*. 75(3):315-320.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis*:

Part 3 Chemical methods. 5:961-1010.

- NIER (National Institute of Environmental Research). 2019. Departmental emission. <http://airemiss.nier.go.kr> on 16
- Nõmmik, H. 1973. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. *Plant Soil*. 39:309-318.
- Pelster, D.E., D. Watt, I.B. Strachan, P. Rochette, N. Bertrand, and M.H. Chantigny. 2019. Effects of initial soil moisture, clod size, and clay content on ammonia volatilization after subsurface band application of urea. *Journal of environmental quality*. 48(3):549-558.
- Pope III, C.A., and D.W. Dockery. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the air & waste management association*. 56(6):709-742.
- RDA (Rural Development Administration, Korea). 1988. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA. Suwon, Korea.
- Searle, P.L. 1984. The Berthelot or indophenol reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen. A review. *Analyst*. 109(5):549-565.
- Warren, G.P., and B.J. Alloway. 2003. Reduction of arsenic uptake by lettuce with ferrous sulfate applied to contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*. 32(3):767-772.
- Wolf, B. 1944. Determination of nitrate, nitrite, and Ammonium Nitrogen rapid photometric determination in soil and plant extracts. *Industrial and Engineering Chemistry*. 16(7):446-44.
- Xenidis, A., C. Stouraiti, and N. Papassiopi. 2010. Stabilization of Pb and As in soils by applying combined treatment with phosphates and ferrous iron. *Journal of Hazardous Materials*. 177(1-3):929-937.