

Short communication

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.4.396>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Ammonia Volatilization in Acidic Mine Soils Applied with Livestock Manure Compost and Liming Materials

Yong-Se Park, Hui-Seon Kim¹, Sang-Mo Lee, and Seok-In Yun^{1*}

National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

¹Department of Bio-Environmental Chemistry and Institute of Life Science and Natural Resources, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

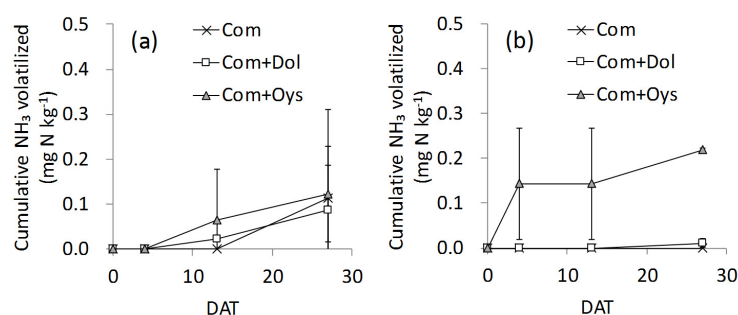
*Corresponding author: siyun@wku.ac.kr

ABSTRACT

Received: August 13, 2018**Revised:** November 16, 2018**Accepted:** November 28, 2018

To investigate the possibility of ammonia volatilization in mine lands limed, we conducted an incubation experiment with treating livestock manure compost as an organic fertilizer and dolomite and oyster shell as a liming material. For trapping ammonia volatilized, installing boric acid in a closed system was efficient, with a recovery of 101.2±3.7%. Treating compost and liming material increased soil pH to a range of 5.75-5.88 for a metal-mine soil and 6.02-6.06 for a coal-mine soil. Ammonium-N in soils decreased rapidly with time during early stage of incubation, but nitrate-N changed little. Accumulated ammonia volatilization during incubation was negligible, less than 0.3 mg N kg⁻¹, and only 0.4-0.5% of ammonium-N was volatilized during incubation. Ammonium fixation by clay minerals and immobilization by soil microbes possibly account for the decrease in concentration of ammonium-N. From these results, we concluded that nitrogen loss by ammonium volatilization would be significantly low when acidic mine soils treated with livestock manure compost and liming materials were neutralized to slightly acidic condition.

Keywords: Ammonia toxicity, Coal mine soil, Dolomite, Metal mine soil, Oyster shell



Cumulative ammonia volatilization in (a) metal and (b) coal mine soils after treating compost (Com), compost and dolomite (Com+Dol), and compost and oyster shell (Com+Oys).



Introduction

광산 주변의 폐석이 적치된 지역은 식생없이 흙이 그대로 노출되다 보니 경관이 흉하고 토양 및 오염물질이 침식되기 쉬워 식생 복구가 필요하다. 폐석이 적치된 지역의 토양은 일반적으로 유기물 및 양분이 부족하고 pH가 낮아 식생 형성에 어려움이 있다 (Sutton and Dick, 1987). 또한 금속 광산의 경우 토양 중금속 함량이 높아 식물에 중금속 독성이 나타나기도 한다 (Lago-Vila et al., 2017). 2007년에 보고된 자료에 의하면 우리나라에 2006개의 광산이 분포하고 있고 (Jung et al., 2010), 여전히 방치되어 있거나 복구 사업 후에도 식생 형성에 어려움을 겪는 지역이 많다.

광산 주변에 폐석이 적치된 지역은 자갈이 많고 점토 및 유기물이 적으며 산성 강도가 높은 것이 일반적이다. Jung et al. (2010)이 수행한 전국 폐광 산림복구지에 대한 토양 화학성 조사에서 1개소를 제외한 11개소의 토양 pH 분포 범위가 4.2-6.6이고 평균 5.2인 산성이었으며, 토양의 유기탄소, 질소, 유효인산 함량이 여전히 낮았다. 이와 같은 광산 주변의 폐석적치지역을 개량하기 위해 퇴비는 토양에 부족한 유기물과 함께 양분을 공급한다는 측면에서, 석회물질은 토양 산도를 개량한다는 측면에서 각각 좋은 개량제로 활용될 수 있다 (Yun et al., 2016). 그 외에도 중금속으로 오염된 산성토양에 석회물질과 유기물질을 처리하여 토양 산도 개량과 함께 유효 중금속을 줄일 수 있었고 그 결과 식생 형성을 증진시킬 수 있다는 연구 보고도 있다 (Pichtel et al., 1994; Basta et al., 2001; Mench et al., 2003; Brown et al., 2005).

산림 지역에서 식물에 필요한 양분 중 질소는 대기 중 질소가 미생물에 의해 고정되어 공급되거나 질소화합물이 강우에 의해 공급된다. 그러나 광산 폐석이 적치된 지역은 식생이 없고 미생물 활성이 낮아 질소 고정이 제한될 수밖에 없고, 강우에 의해 공급되는 질소도 식생 형성 및 생육에 필요한 양보다 부족하기 쉽다. 가축분 퇴비는 질소를 포함한 다양한 양분을 함유하고 있어 토양에 부족하기 쉬운 양분을 공급해 줄 수 있다. 가축분 퇴비는 질소, 인, 칼륨을 포함한 여러 필수영양원소를 함유하고 있어 화학비료를 대체하는 비료로 사용되고 있고 (Kang and Roh, 2011; Kang et al., 2011), 유기질 비료로서 토양 구조 발달에 기여할 수 있다 (Lee and Yun, 2014).

가축분 퇴비는 pH가 높기 때문에 유기물의 무기화로 생성된 암모늄태 (NH_4^+ 또는 NH_3) 질소는 대기로 휘산될 수 있다. Kang et al. (2011)의 연구에서 3년 동안 사용한 돈분, 계분, 우분 퇴비의 pH가 8.4-9.3인 것처럼 일반적으로 퇴비는 알칼리성이다. 토양에서 암모니아 휘산은 pH 7이상에서 발생하기 쉽다고 알려져 있고 (Rochette et al., 2013), 퇴비 내 질소는 발효 과정 또는 토양에서 암모니아 휘산에 의해 손실됨으로써 식물의 질소이용효율이 낮아질 수도 있다 (Li et al., 2017). 또한 암모니아 기체는 식물 세포로 확산 침투된 후 세포 내 액포와 세포기질 사이의 pH 조절에 개입하고 세포대사를 방해함으로써 식물 독성을 일으킬 수 있다고 여러 식물에 대해 보고되었다 (Bremner and Krogmeier, 1988, 1989; Wilson et al., 1998; Haden et al., 2011).

토양 pH가 7이하의 약산성이더라도 토양 내 염기 생성 반응에 의해 암모니아는 휘산될 수 있다. Haden et al. (2011)은 약산성 조건에서 요소가 가수분해되어 암모니아가 휘산되는 연구사례를 보여주었다. 광산지역 토양 개량을 위해 사용되는 석회물질은 용해되면서 염기 이온을 방출하고 그 결과 토양 내 암모늄태 질소 휘산에 관여할 수 있다. 본 연구는 금속 및 석탄광산의 폐석이 적치된 지역 토양에 식생을 복구하기 위한 목적으로 퇴비와 석회물질을 처리할 경우 토양에서 암모니아 휘산 가능성을 구명하기 위해 수행하였다. 실험을 위해 토양 산도는 약산성으로 개량하였고, 암모니아 휘산량을 측정하기 위해 사용된 붕산 (H_3BO_3) 포집법의 성능을 평가하였다.

Materials and Methods

토양 및 개량제 시험에 사용한 금속광산 토양은 대구광역시 달성군 가창면 상원리 일대에 위치한 광산에서 (Yun et al., 2016), 석탄광산 토양은 강원도 삼척시 도계로 225번지 일대에 위치한 광산에서 2015년에 채취하였다. 채취 토양은 풍건 후 2 mm 체로 걸러서 분석 및 배양 실험에 이용하였다. 금속광산 토양은 Yun et al. (2016)에서 사용한 토양과 같기 때문에 토양의 물리화학적 성질도 Yun et al. (2016)에서 제시된 것과 동일하다. 두 광산지역 토양은 pH (soil:water=1:5)가 각각 4.37 (금속광산), 4.59 (석탄광산)으로 산성이었고, 토양의 물리화학적 성질은 Table 1에 제시하였다. 총탄소와 총질소는 원소분석기 (Flash 2000, Thermo Scientific, USA)로 분석하였고, NH_4^+ 와 NO_3^- 는 토양을 2 M KCl로 침출한 후 MgO와 Devarda 합금을 순차적으로 넣어 증류하여 분석하였으며, 토성은 피펫법으로 분석하였다 (NIAS, 2000). NaOH 첨가에 따른 토양 pH 변화를 측정함으로써 토양 산도를 개량하는 데 필요한 염기 양을 구하였다. 금속광산과 석탄광산 토양 pH를 6.5까지 증가시키는 데 필요한 염기의 양은 각각 $3.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $0.88 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이었다. -33 kPa의 매트릭포텐셜에서 금속광산과 석탄광산 토양의 수분함량, 즉 포장용수량은 각각 20%, 18% (v/v)였다.

Table 1. Physicochemical properties of the soils used for the experiment.

Soils	pH _{1:5}	Total C	Total N	NH_4^+	NO_3^-	Sand	Silt	Clay	Soil texture
		----- g kg ⁻¹ -----		----- mg kg ⁻¹ -----		----- g kg ⁻¹ -----			
Metal mine	4.37	3.3	0.08	2.6	0.3	705	186	109	Sandy loam
Coal mine	4.59	163	1.2	3.6	1.2	780	114	106	Sandy loam

회산 암모니아 포집 방법 평가 시험 회산 암모니아 포집을 위해 붕산 (H_3BO_3) 용액을 이용하였고, 이에 대한 성능을 평가하기 위한 시험을 수행하였다. NaOH 0, 1, 2, 5, 10, 20 mM 용액 25 mL를 각각의 비커에 담은 후 2% H_3BO_3 용액 10 mL가 담긴 튜브와 함께 1 L 배양용기에 넣었다. 2.3 mg N mL^{-1} 의 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 용액 1 mL를 NaOH 용액이 담긴 비커에 넣은 후 바로 배양용기 뚜껑을 닫아 밀봉하였다. 25°C의 배양기에서 7일간 배양 후 NaOH 용액과 H_3BO_3 용액에 있는 암모늄태 질소를 분석하였다. NaOH 용액에 남은 암모늄태 질소는 10 M NaOH 20 mL를 넣어 증류하여 황산 용액에 포집한 후 NaOH 용액으로 적정하여 분석하였다. H_3BO_3 용액에 포집된 질소는 HCl 용액으로 적정하여 분석하였고, 모든 처리는 3회 반복하여 실시하였다. 각 용액에 포집된 질소는 처리한 질소에 대한 백분율로 나타내어 회수율을 구하였다.

배양 실험 배양 조건 및 방법은 Yun et al. (2016)의 방법에 따라 진행하였다. 방법을 요약해보면, 토양 40 g (건 토 기준)을 200 mL 폴리에틸렌 병에 담아 포장용수량보다 4%(v/v) 낮은 수준으로 수분을 맞춘 후 25°C의 암조건 배양기에서 7일간 예비 배양하였다. 개량제 처리는 금속광산과 석탄광산 토양에 대해 각각 퇴비 처리 (S_compost), 퇴비에 고토석회 혼합처리 (S_compost+dolomite), 퇴비에 패화석 혼합처리 (S_compost+oyster shell)를 3반복으로 두었다. 금속광산과 석탄광산 토양에 대해 퇴비는 40 Mg ha^{-1} 로 동일하게 처리하였고, 고토석회는 두 지역에 대해 각각 $9.7, 2.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ 로 처리하였으며, 패화석은 각각 $11.2, 3.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ 로 처리하였다. 시험에 사용된 퇴비는 톱밥, 팽연왕겨, 계분, 곡물박, 우분 등을 혼합하여 제조한 부산물 비료이다. 퇴비, 고토석회, 패화석은 모두 시판품을 구입하여 사

용하였다. 각 개량제를 처리한 토양은 포장용수량으로 수분을 맞춘 후 1 L 배양용기에 넣었고, 동시에 2% H_3BO_3 용액이 담긴 튜브를 배양용기에 넣었으며, 뚜껑을 닫아 밀봉 후 25°C 암조건에서 배양하였다.

분석 암모니아 휘산량을 측정하기 위해 개량제 처리 후 4, 13, 27일에 배양용기 안의 H_3BO_3 용액을 빼 낸 후 HCl 용액으로 적정하였다. H_3BO_3 용액을 제거한 후 토양은 포장용수량으로 수분을 맞추었고 새로운 H_3BO_3 용액과 함께 배양용기에 넣어 다시 배양하였다. 개량제 처리 후 0, 13, 27일에 각 처리구에서 3개의 폴리에틸렌 병을 선택하여 토양을 모두 채취하였다. 채취한 토양은 무기태 질소를 측정하기 위해 2 M KCl로 침출한 후 MgO와 Devarda 합금을 순차적으로 넣어 증류하였고, 각 단계별 증류과정에서 분리된 암모니아는 황산용액에 포집한 후 NaOH로 적정하였다. 개량제 처리 후 0일 차에 채취한 토양은 1:5 비율의 증류수로 진탕한 후 pH를 측정하였다.

Results and Discussion

휘산 암모니아의 포집 효율 NaOH를 첨가한 후 $(NH_4)_2SO_4$ 용액의 pH는 염기성 상태로 높아졌다 (Table 2). 용액 내에서 산성 이온인 NH_4^+ 는 염기 조건에서 NH_3 로 전환되고, 이 경우 질소는 대기로 휘발되어 손실될 수 있다. 일반적으로 염기성뿐만 아니라 약산성에서 암모니아 휘발이 일어날 수 있고 보통 pH가 7이상일 경우 활발히 일어난다. Rochette et al. (2013) 연구에 따르면 토양 pH 5.1-9.0의 범위에서 시비한 요소 비료 중 8-68%의 질소가 휘산에 의해 손실되었다고 보고하였다.

휘산되는 암모니아를 포집하기 위한 방법으로 H_3BO_3 용액을 이용하였다. H_3BO_3 용액의 암모니아 효율을 평가하기 위해 배양 용기에 NaOH를 넣었고, 그때 pH는 8.6-11.8의 범위로 증가하였다 (Table 2). 그 후 배양 용기에 황산암모늄 ($(NH_4)_2SO_4$) 용액과 H_3BO_3 용액을 각각 넣었고 7일간 방치한 후 각 용액에 존재하는 암모늄태 질소를 측정하였다. NaOH 첨가량에 따라 황산암모늄 용액과 H_3BO_3 용액에 존재하는 질소 양은 서로 상반된 변화를 보였다. 먼저 NaOH를 넣지 않았을 경우 대부분의 질소는 황산암모늄 용액에 존재하였고 (98.7±1.2%), 휘발된 암모니아는 본래 암모늄 양의 0.1±0.2%로 미량이었다. NaOH를 넣어 pH가 증가함에 따라 황산암모늄 용액에 잔류하는 질소 양은 감소

Table 2. Acidity of ammonium sulfate solution after adding NaOH and recovery of N in ammonium sulfate solution and boric acid solution placed in closed-incubating jars after 7 days.

NaOH added [†]	pH	Residual N [‡]	Volatilized N	Total recovery of N
mmol		----- % of added N -----		
0		98.7(1.2) [§]	0.1(0.2)	98.7(0.9)
0.025	8.6	90.3(2.0)	6.0(2.0)	96.2(3.8)
0.050	9.0	82.4(1.1)	17.4(2.8)	99.8(1.9)
0.125	10.0	44.0(4.7)	62.4(9.5)	106.4(5.1)
0.250	11.2	17.6(10.3)	86.6(14.1)	104.2(6.7)
0.500	11.8	15.0(9.9)	86.8(17.6)	101.8(7.6)

[†]The mole of NaOH added to the solution containing 2.28±0.03 mg N of ammonium sulfate

[‡]Residual and volatilized N mean the recovery of N in ammonium sulfate solution and boric acid solution, respectively. Total recovery of N is the sum of residual and volatilized N.

[§]The values in parentheses are standard deviations of means (n=3).

하였고, 감소한 양에 해당하는 양만큼 H_3BO_3 용액에 존재하는 질소 양은 증가하였다. 모든 처리구에서 처리 질소의 회수율 범위는 98.7-106.4%였고 평균 회수율은 $101.2 \pm 3.7\%$ 였다. 바탕 적정으로 확인한 검출한계는 0.03 mg N 으로 처리한 질소의 1.5%에 해당하는 양이었다. 이와 같은 결과는 암모니아 휘산에 의해 손실되는 질소를 포집하는 데에 산성의 H_3BO_3 용액이 사용될 수 있음을 보여준다.

광산지역 산성토양의 개량에 따른 암모니아 휘산 광산 주변지역 산성토양에 퇴비, 석회물질을 처리하였을 경우 토양 pH는 증가하였다 (Table 3). 퇴비를 처리한 금속광산 토양 pH는 4.37에서 4.78로 증가하였고 석탄광산 토양 pH는 4.59에서 5.31로 증가하였다. 퇴비와 함께 석회물질을 처리하였을 경우 토양 pH는 더욱 크게 증가하였다. 금속광산 토양 pH는 5.75-5.88의 범위로 증가하였고, 석탄광산 토양은 6.02-6.06의 범위로 증가하였다. 퇴비와 석회물질을 처리한 후 토양 pH가 약산성이기 때문에 암모니아 휘산에 의한 질소 손실이 적을 것으로 예상되었다. 그러나 염기성뿐만 아니라 약산성 토양에서도 암모니아가 휘산될 가능성이 있고 토양의 물리화학적 성질이 암모니아 휘산에 영향을 줄 수 있기 때문에 (Zhenghu and Hongland, 2000; Rochette et al., 2013), 석회 시비 후 토양에서 암모니아 휘산 발생에 대한 평가가 필요하다.

암모니아로 탈양성자화될 수 있는 암모늄태 (NH_4^+) 질소 농도가 퇴비 처리 후 크게 증가하였다. 시험 전 암모늄태 질소 농도는 금속광산 토양이 2.6 mg N kg^{-1} , 석탄광산 토양이 3.6 mg N kg^{-1} 이었고, 퇴비를 처리한 후 각각 $64.7 \text{ mg N kg}^{-1}$, $64.0 \text{ mg N kg}^{-1}$ 이었다. 퇴비와 함께 패화석을 혼합 처리하였을 경우 토양 암모늄태 질소 농도는 퇴비를 단독으로 처리한 토양과 비슷하였지만, 퇴비와 함께 고토석회를 혼합 처리한 토양은 $86.7\text{-}87.0 \text{ mg N kg}^{-1}$ 으로 더 높았다. 본 시험에 사용한 고토석회는 암모늄태 질소를 함유하고 있고 (Yun et al., 2016), 그 결과 고토석회를 처리한 토양에 암모늄태 질소가 더 많이 존재하였다.

개량제 처리 후 13일 동안 암모늄태 질소 농도는 $19.3\text{-}41.4 \text{ mg N kg}^{-1}$ 만큼 감소하였지만 질산태 질소 농도는 4.4 mg N kg^{-1} 이하로 증가하거나 오히려 감소하기도 하였다. 토양에서 암모늄태 질소가 감소하는 주요 경로 중에 하나는 질산으로 변하는 산화다. 그러나 질산태 질소가 적게 변화하였기 때문에 암모늄태 질소는 다른 경로를 거쳐 감소하였을 것이다. 토양 내 암모늄태 질소는 질산으로 산화되는 것 외에도 토양 광물 중의 암모니아 고정, 식물 및 미생물에 의한 부동화, 혐기성 암모니아 산화 (annamox, anaerobic ammonia oxidation), 대기 중으로 암모니아 휘산 등의 반응을 보인다 (Yun et al., 2011). 먼저 식물이 없었기 때문에 식물에 의한 부동화는 제외할 수 있고, 토양수분 조건이 포장용 수량으로 호기 조건이기 때문에 혐기성 암모니아 산화 가능성도 낮다고 판단된다 (Yun et al., 2011). 미생물에 의한 질소 부동화는 개량제 처리 후 증가할 수 있고, 특히 초기 토양 유기물 및 양분이 부족한 상황에서 퇴비 처리로 미생물 활성은 뚜렷하게 증가할 수 있다. 본 연구에서 사용한 시험 토양을 대상으로 조사한 연구에서 시험 전 토양 미생물생

Table 3. pH of metal and coal mine soils after treating compost, compost and dolomite, and compost and oyster shell.

Treatments	pH	
	Metal mine	Coal mine
No treatment	4.37(0.23) [†]	4.59(0.19)
Compost	4.78(0.03)	5.31(0.02)
Compost+Dolomite	5.88(0.28)	6.02(0.02)
Compost+Oyster shell	5.75(0.02)	6.06(0.04)

[†]The values in parentheses are standard deviations of means (n=3).

체탄소가 17 mg C kg^{-1} 으로 낮았지만 퇴비 처리 후 7일에 54 mg C kg^{-1} 으로 증가하였고, 퇴비에 석회물질을 처리할 경우 $94\text{--}121 \text{ mg C kg}^{-1}$ 으로 더욱 증가하였다 (Yun et al., 2016). 개량제 처리로 미생물생체량이 증가하였기 때문에 미생물에 의해 동화된 질소도 증가하였을 것이다. Xu et al. (2012)은 12개의 생물군계를 대상으로 조사한 결과 미생물생체탄소/미생물생체질소의 비율은 6.3-9.5였고, 지구 평균은 7.6이었다고 보고하였다. 지구 평균 값을 이용할 경우, 미생물생체로 흡수된 질소 양은 $5\text{--}14 \text{ mg N kg}^{-1}$ 이고, 퇴비 효과를 제외하고 석회물질의 영향만 고려하였을 때 $5\text{--}9 \text{ mg kg}^{-1}$ 이다. 석회물질의 영향만 고려한 이 양은 본 연구에서 13일동안 감소한 암모늄태 질소 농도 ($19.3\text{--}41.4 \text{ mg N kg}^{-1}$)의 27-37%에 해당하는 양이다. 또한 질소가 부족했던 토양에 암모늄태 질소가 유입될 경우 토양 광물에 의한 격리 현상도 초기에 발생할 수 있다 (Said, 1973). 마지막으로 암모니아 휘산에 의한 질소 손실은 약산성 토양에서 적게 발생하지만 이를 완전히 배재할 수는 없다 (Yun et al., 2016). Rochette et al. (2013)은 토양 산도에 따라 다르지만 약산성부터 약알칼리까지 다양한 토양산도 조건에서 암모니아가 휘산될 수 있다고 보고하였다.

배양 27일 동안 암모니아 휘산 누적량은 0.3 mg N kg^{-1} 이하였고 (Fig. 2), 배양기간 동안 암모늄태 질소 농도인 $37.2\text{--}87.0 \text{ mg N kg}^{-1}$ 에 비해 매우 적었다 (Fig. 1). Haden et al. (2011)은 벼를 대상으로 암모니아 휘산에 따른 발아 실험을 하였고, 휘산된 암모니아 양이 20 mg N kg^{-1} 이하인 수준에서 식물 발아율은 큰 변화없이 93%이상 유지하였으나, 암모니아 휘산량이 더 증가할 경우 발아율은 급격히 감소하였다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서 암모니아 휘산은 식물에 독성을 일으키기에 미비한 수준이라고 판단된다. 금속광산의 경우 퇴비와 석회물질 처리 토양에서 휘산

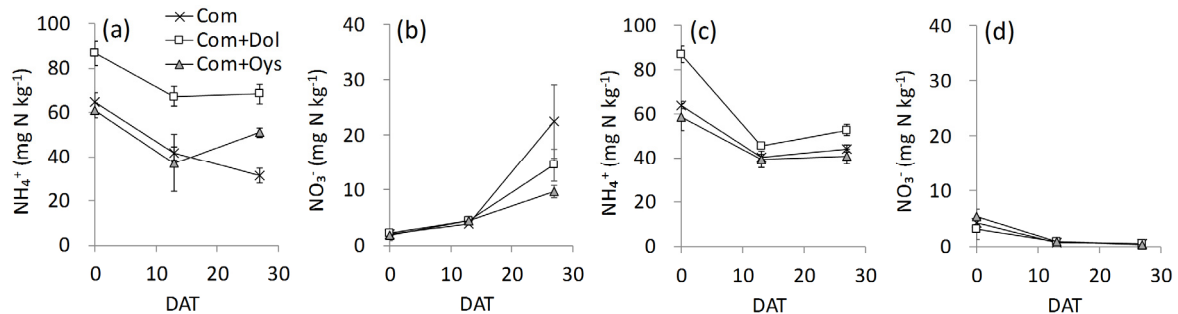


Fig. 1. Temporal changes in concentration of 2 M KCl extractable NH_4^+ and NO_3^- in metal (a and b) and coal mine soils (c and d) after treating compost (Com), compost and dolomite (Com+Dol), and compost and oyster shell (Com+Oys). Vertical bars are standard deviations of means ($n=3$).

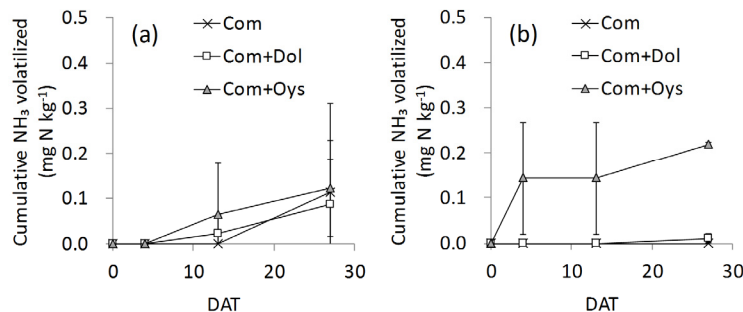


Fig. 2. Cumulative ammonia volatilization in (a) metal and (b) coal mine soils after treating compost (Com), compost and dolomite (Com+Dol), and compost and oyster shell (Com+Oys). Vertical bars are standard deviations of means ($n=3$).

된 암모니아 양은 처리구별로 차이가 없었고, 초기 존재했던 암모늄태 질소의 0.1-0.2%만이 휘산되었다. 또한 암모니아 휘산 양은 배양기간동안 감소된 토양 암모늄태 질소 양의 0.4-0.5%에 해당하는 양으로 차지하는 비중이 매우 적었다. 따라서 본 연구에서 배양 초기에 암모늄태 질소 농도의 급격한 감소 원인으로 암모니아 휘산을 배제할 수 있고, 미생물에 의한 부동화 및 토양광물에 의한 고정이 주요 원인이라고 판단된다. 결론으로 암모니아 휘산은 토양 내 질소 손실을 의미하고 (Li et al., 2017), 식물에 스트레스 및 생육 장애를 일으키기도 하지만 (Haden et al., 2011), 본 연구 조건에서 암모니아 휘산에 의한 질소 손실과 식물에 대한 스트레스는 낮을 것으로 판단된다.

Conclusions

본 연구는 광산지역 산성 토양의 개량을 위해 퇴비와 함께 석회물질을 처리하였을 때 토양으로부터 암모니아 휘산에 의한 질소 손실 가능성을 구명하고자 수행하였다. 암모니아 휘산 양을 측정하기 위해 이용한 붕산 (H_3BO_3)은 회수율이 $101.2 \pm 3.7\%$ 였고, 휘산된 질소를 포집하는 데에 이용될 수 있음을 보여주었다. 금속광산과 석탄광산 토양 pH는 퇴비와 함께 석회물질을 처리한 후 5.75-5.88, 6.02-6.06의 약산성 수준으로 증가하였다. 토양의 암모늄태 질소는 퇴비와 석회물질 처리 후 초기에 크게 감소하였으나 질산태 질소는 큰 변화가 없었다. 휘산된 암모니아 누적 양은 0.3 mg N kg^{-1} 이하였고, 배양기간 동안 감소한 암모늄태 질소의 0.4-0.5%로 차지하는 비중이 매우 적었다. 따라서 배양 초기에 감소한 암모늄태 질소는 질산으로 산화되기 보다는 대부분 미생물에 의해 부동화되거나 토양 광물에 의한 고정되었다고 판단된다. 본 연구 결과는 퇴비와 석회물질은 광산지역 산성토양을 약산성으로 개량할 경우 암모니아 휘산에 의한 질소 손실이 적다는 것을 제시해 준다.

Acknowledgement

This paper was supported by Wonkwang university in 2017.

References

- Basta, N.T., R. Gradwohl, K.L. Snethen, and J.L. Schroder. 2001. Chemical immobilization of lead, zinc, and cadmium in smelter-contaminated soils using biosolids and rock phosphate. *J. Environ. Qual.* 30:1222-1230.
- Bremner, J.M. and M.J. Krogmeier. 1989. Evidence that the adverse effect of urea fertilizer on seed germination in soil is due to ammonia formed through hydrolysis of urea by soil urease. *Proc. Natl. Acad. USA.* 86:8185-8188.
- Brown, S.L., M. Sprenger, A. Maxemchuk, and H. Compton. 2005. Ecosystem function in alluvial tailings after biosolids and lime application. *J. Environ. Qual.* 34:1-6.
- Haden, V.R., J. Xiang, S. Peng, Q.M. Ketterings, P. Hobbs, and J.M. Duxbury. 2011. Ammonia toxicity in aerobic rice: use of soil properties to predict ammonia volatilization following urea application and the adverse effects on germination. *Eur. J. Soil Sci.* 62:551-559.
- Jung, M.H., H.H. Kwon, T.H. Kim, G.S. Choi, and S.L. Kim. 2010. Characteristics of soil chemical and microbiological properties in abandoned coal mine forest rehabilitation areas. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:424-429.
- Kang, C.S., A.S. Roh, S.K. Kim, and K.Y. Park. 2011. Effects of the application of livestock manure compost on

- reducing the chemical fertilizer use for the lettuce cultivation in green house. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:457-464.
- Kang, C.S. and A.S. Roh. 2011. Quality characteristics of livestock feces composts commercially produced in Gyeonggi province in 2008. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:293-296.
- Lago-Vila, M., Rodríguez-Seijo, A., Arenas-Lago, D., Andrade, L., and Vega, M.F.A. 2017. Heavy metal content and toxicity of mine and quarry soils. *J. Soils Sediments.* 17:1331-1348.
- Lee, J.E. and S.I. Yun. 2014. Effects of compost and gypsum on soil water movement and retention of a reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:340-344.
- Li, Y., L. Huang, H. Zhang, M. Wang, and Z. Liang. 2017. Assessment of ammonia volatilization losses and nitrogen utilization during the rice growing season in alkaline salt-affected soils. *Sustainability.* 9:132.
- Mench, M., S. Bussière, J. Boisson, E. Castaing, J. Vangronsveld, Ruttens A, T. De Koe, P. Bleeker, A. Assunção, and A. Manceau. 2003. Progress in remediation and revegetation of the barren Jales gold mine spoil after *in situ* treatments. *Plant Soil.* 249:187-202.
- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Pichtel, J.R., W.A. Dick, and P. Sutton. 1994. Comparison of amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine land. *J. Environ. Qual.* 23:766-772.
- Rochette, P., D.A. Angers, M.H. Chantigny, M.O. Gasser, J.D. MacDonald, D.E. Pelster, and N. Bertrand. 2013. NH_3 volatilization, soil NH_4^+ concentration and soil pH following subsurface banding of urea at increasing rates. *Can. J. Soil Sci.* 93:261-268.
- Said, M.B. 1973. Ammonium fixation in the Sudan Gezira soils. *Plant Soil.* 38: 9-16.
- Sutton, P., and W.A. Dick. 1987. Reclamation of acidic mined lands in humid areas. *Adv. Agron.* 41:377-406.
- Wilson, G.H., F. Grolig, and H. Kosegarten. 1998. Differential pH restoration after ammonia-elicited vacuolar alkalization in rice and maize root hairs as measured by fluorescence ratio. *Planta.* 206:154-161.
- Xu, X., P.E. Thornton, and W.M. Post. 2013. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecol. Biogeogr.* 22:737-749.
- Yun, S.I., D.H. Seo, H.S. Kang, H. Cheng, G. Lee, W.J. Choi, C.K. Lee, and M.H. Jung. 2016. Effects of dolomite and oyster shell on nitrogen processes in an acidic mine soil applied with livestock manure compost. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:614-620.
- Yun, S.I., H.M. Ro, W.J. Choi, and G.H. Han. 2011. Interpreting the temperature-induced response of ammonia oxidizing microorganisms in soil using nitrogen isotope fractionation. *J. Soils Sediments.* 11:1253-1261.
- Zhenghu, D. and X. Honglang. 2000. Effects of soil properties on ammonia volatilization. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46:845-822.