

신진과학자상

가축분 퇴·액비 시용에 따른 암모니아 휘산량 평가 Evaluation of Ammonia Emission from Arable Soil applied Liquid Manure and Compost

이용복 · 윤홍배 · 이연 · 권덕인
농촌진흥청 국립농업과학원

Yong-Bok Lee, Hong-Bae Yun, Youn Lee, and Dugin Kaown
(National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, 441-707, Korea)

ABSTRACT

Emission of ammonia to the atmosphere are considered a threat to the environment. The application of livestock manure and compost contributes significantly to the emission of ammonia from agriculture. The reduction in NH_3 losses from field-applied manure and compost would be a good strategy to reduce national NH_3 emission. In this study, various application techniques of liquid manure and compost were compared to evaluate their potential for reducing NH_3 emission. In compost application, the reductions in NH_3 emission were 70 and 15% for immediately rotary after application (IRA) and rotary at 3-day after application (RA-3d) in comparison with surface application (SA). Total ammonia emissions for 13 days, expressed as % ammonia-N applied in compost, were 42, 35.7, and 12.7% for SA, RA-3d, and IRA treatments, respectively. Mean reductions in NH_3 emission from application of liquid pig manure were 26 and 50% for rotary harrow after surface broadcast application in spring and fall, respectively, in comparison with surface broadcast application. Ammonia emission rate was decreased with increasing water content in soil due to dilution effect, but this reduction only was temporary up to 12 hours after application and cumulative NH_3 emission was increased with increasing water content in soil. However, the delay would be beneficial because it allows time for rotary hallow of the applied liquid pig manure. Therefore, ammonia emission can be reduced by immediately incorporation of liquid manure and compost after surface application.

Key Word : Ammonia emission, liquid manure, compost



1. 서론

대기 중의 암모니아 (NH_3)는 강하 (Deposition)을 통해서 수계의 부영양화를 유발하고, 자연생태계의 산성화를 초래하고, 그리고 생물상의 다양성 변화에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다¹⁻³⁾. 1990년 지구 전체 암모니아 휘산량은 51 Tg N/year 으로 추정 되고, 이중 60%가 농축산업이 차지하고 있다⁴⁾. 유럽의 경우 농축산분야 암모니아 휘산량의 약 33%는 가축분뇨를 농경지에 살포하는 과정에서 발생 된다고 보고하고 있다⁵⁾.

축산업이 발달된 유럽은 1999년 UN의 Gothenburg Protocol에서 암모니아를 장거리 대기오염 물질에 포함시킨 이후 국가 단위의 암모니아 발생량 측정과 휘산저감에 지속적인 연구를 하고 있다. Sommer & Hutchings⁶⁾와 Meisinger & Jokela⁷⁾의 연구결과에서 슬러리 살포시 대부분의 암모니아 휘산은 살포 초기 즉, 6~12시간 이내에 총 암모니아 휘산량의 30~70%가 휘산 된다고 하였다. Smith 등⁸⁾은 슬러리 살포 방법간 암모니아 휘산량을 비교한 결과 표층살포 대비 shallow injection (57%) > trailing shoe(43%) > band spread (39%) 순으로 암모니아 휘산 저감효과가 있다고 하였다. 그리고 Klassen⁹⁾는 가축분 살포과정에서 암모니아 휘산량 감소는 국가단위의 암모니아 휘산량 감소에 있어 가장 경제적이고, 우선되어야 할 것이라고 강조하였다. 또한, 가축분뇨 이용과정에서 암모니아 휘산량 감소는 자연생태계 보존뿐만 아니라 작물생산력에 대한 가축분뇨의 질소 이용을 향상에도 기여 한다.

우리나라의 경우 유럽과는 달리 대부분의 가축분뇨는 퇴·액비로 자원화 되어 농경지에 이용되고 있다. 1980년 이후 우리나라의 가축분뇨 발생량은 해마다 증가하고 있는 추세이며, 2006년 약 4,392만톤이 발생하였다. 2006년도 기준 가축분뇨 발생량의 82%가 퇴·액로 자원화 되고 있지만, 돈분뇨의 14%는 해양배출에 의해 처리되고 있다. 그리고 2012년 해양배출이 금지되므로 약 4천여 만톤의 돈분뇨도 자원화과정 등에 의해서 처리되어야 하는 현실에 직면해 있다. 따라서 국가 차원에서 가축분뇨의 적절한 활용방안과 농경지 시용에 대한 연구에 많은 지원하고 있다. 하지만 가축분 퇴·액비 시용과정에서 발생하는 암모니아 휘산에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구는 가축분 퇴·액비 시용과정에서 암모니아 휘산량을 정량적으로 평가하고, 토양조건과 경운방법간의 암모니아 휘산량을 비교 평가하여 이를 저감하기 위한 대책 수립을 위한 기초자료를 얻고자 수행 되었다.

2. 재료 및 방법

가. 돈분퇴비 및 액비의 이화학적 특성

본 연구의 포장 및 실내시험에서 이용된 공시토양은 유기물 및 질소 함량이 다소 낮은 식양질 계통의 숙전이며, 그 이화학적 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다. 공시퇴비는 시판 돈분퇴비를 시용하였으며, 돈분액비는 국립축산연구원의 돈사에서 배출되는 돈분뇨를 고액 분리한 것으로 저장조에 2~3일 저장한 액상을 채취하여 이용하였다 (Table 2).

Table 1. Characteristics of soil used in this experiment

pH (1:5)	O.M	T-N	Av.P ₂ O ₅	Ex. cations		
				K	Ca	Mg
5.9	13.0	1.20	285	0.44	5.96	1.68

Table 2. Characteristic of compost and liquid manure used in this experiment

	Moisture	O.M	T-N	P ₂ O ₅	NH ₄ -N	OM/N ratio	Solid
Compost	40.0	455	18.4	12.5	3,400	24.7	0.5
Liquid manure			9.0	10.3	980		

나. 암모니아 포집 및 측정방법

1) 윈드터널 (wind tunnel) 방법

포장에서 암모니아 휘산량 측정을 위한 실험 장치는 Meisinger 등⁷⁾이 고안한 소형 윈드터널 방법을 변형하여 Fig. 1과 같이 제작하여 이용하였다. 이 윈드터널은 canopy, motor, 및 암모니아 포집 부분으로 구성되어 있다. Canopy는 2.0 m x 0.4 m 알루미늄 틀에 높이 50 cm 의 \cap 모양의 투명 아크릴을 연결하였다. 윈드터널의 canopy 내 풍속을 1 m/sec 로 유지되도록 모터의 속도를 조절하였다. 그리고 모터 앞부분에 Fig. 1에서 보는 바와 같이 암모니아 포집용 관을 설치 (\varnothing 0.6 cm) 하고 이관은 0.05 N - H₂SO₄ 용액이 들어 있는 포집용기를 통과하게 만들어 졌다. 이때, 포집용 관의 공기 흐름은 2 L/min 로 전체 윈드터널 공기 양의 1/4555 이다. 그리고 암모니아 포집용 관의 공기 흐름은 flow meter (Cole parmer) 와 air 펌프로 조절하였다.

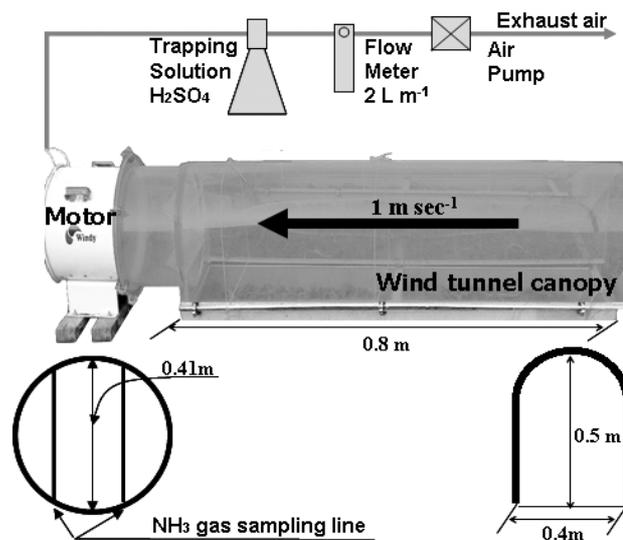


Fig 1. Diagram of the wind tunnel for trapping ammonia in the field.

학원 포장에서 봄(5월)과 가을(10월) 2회에 걸쳐 윈드터널을 이용하여 실시하였다. 돈분 액비는 봄과 가을에 각각 11, 22 Mg/ha 를 사용하였다. 경운 처리구는 가축분 액비를 표층 살포 후 즉시 경운 하였으며 (RH), 대조구로 표층살포 후 무경운을 설정하였다 (No-RH). 사용 후 1일째는 3, 3, 6, 12 시간 간격, 2, 3일째는 12시간 간격, 그리고 4일째 부터는 24시간 간격으로 암모니아를 포집 하였다. 그리고 봄에는 12일간 실시하였으며, 가을에는 7일간 실시하였다.

3) 돈분 액비 살포시 토양 수분함량 및 담수시기에 따른 암모니아 휘산량

돈분액비 사용 후 토양수분함량에 따른 암모니아 휘산량은 dynamic chamber (Fig. 2)를 이용하여 실내시험으로 실시하였다. 토양 수분함량은 15 와 25% (wt /wt)로 조절하였고, 대조구로 건조토양 (air dry) 설정하였다. 이때 돈분 액비는 포장시험에서와 동일한 것을 이용했으며 20 Mg/ha 의 비율로 처리하였다.

돈분 액비 사용 후 담수시간에 따른 암모니아 휘산량을 비교하여 위해서 dynamic chamber 법을 이용하여 실내에서 수행 하였다. 처리내용은 담수상태에서 돈분 액비 사용 (FOT), 건조에 돈분액비 사용 1 (FIT) 및 3일 (F3T) 후 FOT처리구와 동일량의 물을 첨가 하였다. 이때 돈분 액비 사용량은 45 Mg/ha 이다.

3. 결과 및 고찰

가. 돈분퇴비 사용 후 경운 유무에 따른 암모니아 휘산량

토양에서 퇴비 사용 후 경운 유무는 암모니아 휘산에 크게 영향을 미쳤다 (Fig. 3). 퇴비를 경운 없이 표층 살포한 SA 처리의 13일간 총 암모니아 휘산량은 28.7 kg N/ha이었다. 이는 퇴비 중 총 질소의 7.8%, $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 42%에 해당되는 양이다. 그러나 퇴비 사용 후 즉시 경운(IRA)과 3일 후 경운(RA-3d)의 암모니아 휘산량은 각각 8.7 및 24.3 kg N/ha로 퇴비 사용 후 즉시 경운이 암모니아 휘산량 저감에 효과적이었다.

퇴비 사용 후 SA 처리구의 단위 시간당 암모니아 휘산량은 처리 6, 12, 24, 48, 72 시간 이후 각각 1.73, 0.64, 0.27, 0.06, 0.06 kg N/ha/h로 처리 6시간 이후 급격히 떨어졌고, 24 시간 이후 큰 변화가 없었으며, 처리 후 24 시간 이내 휘산된 암모니아 양은 13일 동안 휘산된 양의 약 61%이었다. 퇴비 처리 3일 후 경운 처리구의 단위 시간당 암모니아 휘산 패턴은 SA 처리구와 비슷하였다. 그러나 퇴비 처리 후 즉시 경운 처리구(IRA)의 단위 시간당 암모니아 휘산량은 처리 6, 12, 24 시간 이후 각각 0.15, 0.19, 0.05 kg N/ha/h로 이 기간 SA와 RA-3d 처리구의 암모니아 휘산율에 비해 현저히 낮았다. Misselbrook 등¹¹⁾은 가축분의 표층 살포 후 몇 시간 이내에 전체 암모니아 휘산량의 약 50%가 휘산되며, 이 기간 단위 시간당 휘산량이 전체 휘산량 증감에 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. 그리고 농경지에 사용된 퇴비에 의한 암모니아 휘산은 사용 후 24 시간 이내 상당량이 이뤄지며, 특히 6시간 이내에 전체 휘산량의 50% 이상이 휘산 된다¹²⁾. 이와 같이 가축분뇨 및 퇴비 표층 살포 후 초기 암모니아 휘산량이 높은 것은 표층의 높은 암모니아태 질소 함량과 pH 때문이다¹³⁾. 그리고 짧은 시간 급격한 암모니아 휘산은 표층의 암모니아



태 질소 농도를 저하 시키므로 이후 암모니아 휘산량이 급격히 감소된다¹⁴⁾. 따라서 농경지에 사용된 가축분 퇴비 사용 후 즉시 경운이 암모니아 휘산을 크게 저감 시킨 것은 사용 후 토양과 혼합함으로써 암모니아태 질소 농도를 휘석하고 토양 교질에 흡착시킨 결과로 판단된다.

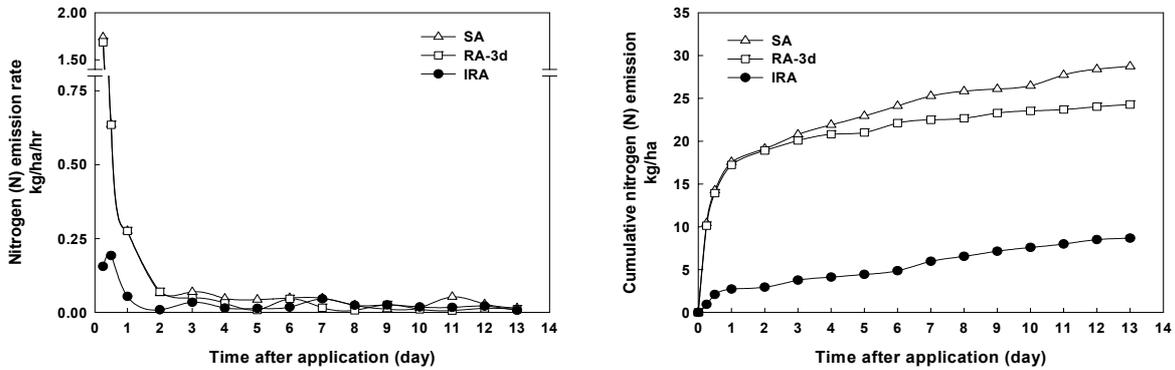


Fig. 3. Typical curves for ammonia emission rate (left) and cumulative emission (right) following surface broadcast (SA), rotary after immediately (IRA) and 3 days (RA-3d) compost application.

나. 돈분액비 사용 후 경운 유무에 따른 암모니아 휘산량

농경지에 가축분뇨 사용 후 암모니아 휘산은 온도, 토양 pH, 공기 중 노출정도 등의 여러 가지 인자에 의해서 영향을 받는다. 특히, 사용된 가축분뇨와 토양의 접촉면적 증가는 암모니아태 질소를 토양에 고정시켜 암모니아 휘산을 크게 감소 시킬 수 있다⁶⁾. 이러한 원리를 이용해서 축산선진국인 EU의 여러 국가에서는 이미 잔디 canopy 밑에 줄로 뿌리거나, 토양 속에 주입하는 방법을 이용하고 있다¹¹⁾. 그리고 Simth등⁷⁾은 줄뿌림 (band-spread), canopy 밑 가는 줄 뿌림 (trailing shoe) 과 토양 주입 (shallow injection) 은 표층살포(surface broadcast application) 보다 암모니아 휘산량은 각각 39, 43, 그리고 57% 감소시킨다고 보고 하였다.

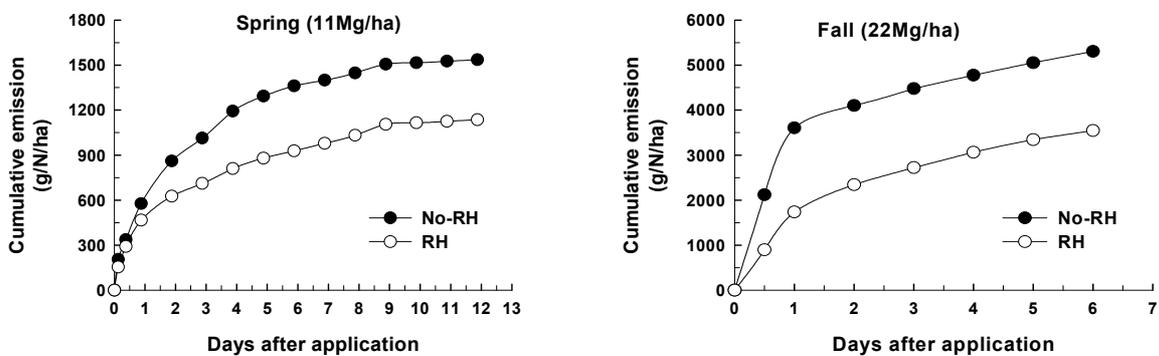


Fig. 4. Comparisons of ammonia emission with (RH) and without (No-RH) rotary harrow following surface application of liquid pig manure

본 연구에서 암모니아 휘산량은 처리 후 1일차에 전체 휘산량의 약 40% 이상이 휘산 되었으며, 이는 퇴비 시용과 비슷한 결과이다. 그리고 봄과 가을에 돈분 액비 시용 후 경운(로터리) 처리는 표층 살포 보다 암모니아 휘산량을 각각 26, 50% 감소시켰다. 특히 돈분 액비 시용량이 증가할수록 암모니아 휘산에 대한 경운효과 크게 나타났다 (Fig. 4).

다. 돈분 액비 살포시 토양 수분함량 및 담수시기에 따른 암모니아 휘산량

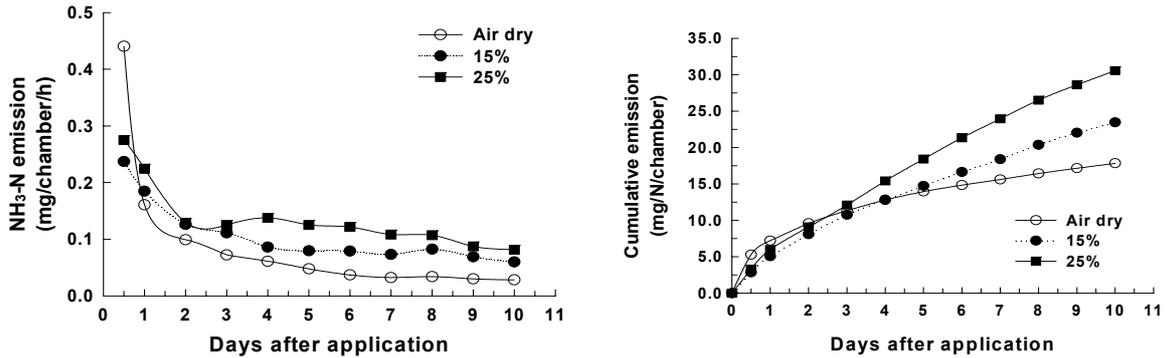


Fig. 5. Ammonia emission rate and cumulative emission with different water content in soil after liquid pig manure application by surface broadcast.

돈분 액비 시용 시 토양 수분함량은 암모니아 휘산 패턴과 휘산량에 크게 영향을 미쳤다. 건조 토양(air dry)은 전체 암모니아 휘산량의 약 40%가 처리 1일 이내에 발생하였고, 토양 수분 함량 15% 25%는 각각 21%, 19% 가 휘산 되었다. 그리고 건조토양은 처리 6일 후 암모니아 휘산은 크게 변화가 없었지만, 수분함량이 높을수록 암모니아 휘산은 지속되어 11일간 전체 암모니아 휘산량은 토양 수분함량이 증가할수록 높았다 (Fig. 5). 이것은 토양 수분이 가축분 액비의 암모니아 농도를 희석시켜 처리 후 일시적으로 암모니아 휘산량을 감소시키지만 1일차 이후 물이 증발 하면서 암모니아 휘산량이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다^{15,16)}. 이와 같이 토양의 일정한 수분 함량은 암모니아 휘산을 지연시키기 때문에 가축분 액비 시용 후 암모니아 휘산량 저감을 위해 경운하는 데 필요한 시간을 제공할 수 있는 이점이 있다고 생각된다.

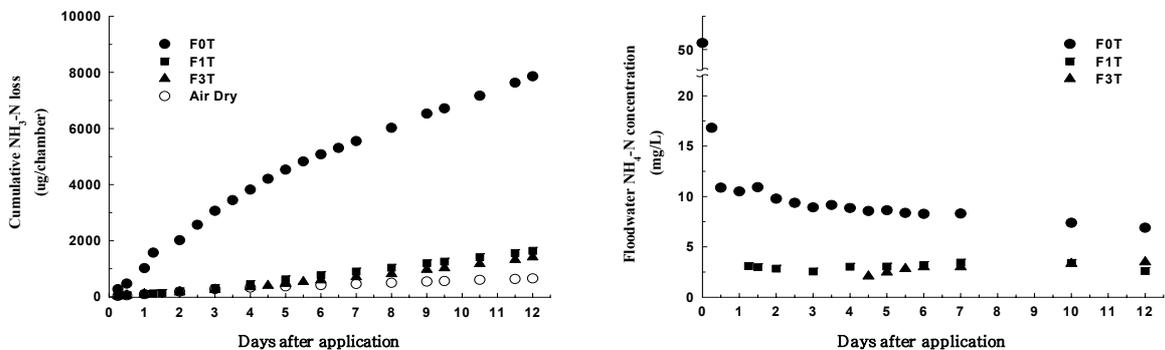


Fig. 6. Cumulative NH₃ emission and concentration NH₄-N in flooding water with different flooding condition.



우리나라에서 돈분 액비는 대부분 논토양에 사용하고 있으며, 봄철 일부 농가에서는 벼 이앙을 위해서 담수 후 돈분 액비는 사용하는 경우가 있다. 그러나 이와 같은 경종방법은 담수 중 암모니아 농도를 증가시켜 암모니아 휘산을 조장시킬 가능성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 담수시기를 돈분 액비 사용 전후로 조절하여 암모니아 휘산량을 평가 하였다. 담수 상태에서 돈분 액비 사용(F0T)은 사용 1일 후 담수(F1T) 보다 약 4.7배의 암모니아 휘산량 증가를 보였다. 그리고 돈분 액비 사용 1일과 3일(F3T) 후 담수처리에서 암모니아 휘산량은 큰 차이를 보이지 않았다. 시간의 경과에 따른 담수 중 암모니아태 질소 함량은 F0T처리구에서 F1T, F3T 처리구보다 낮았다(Fig. 6).

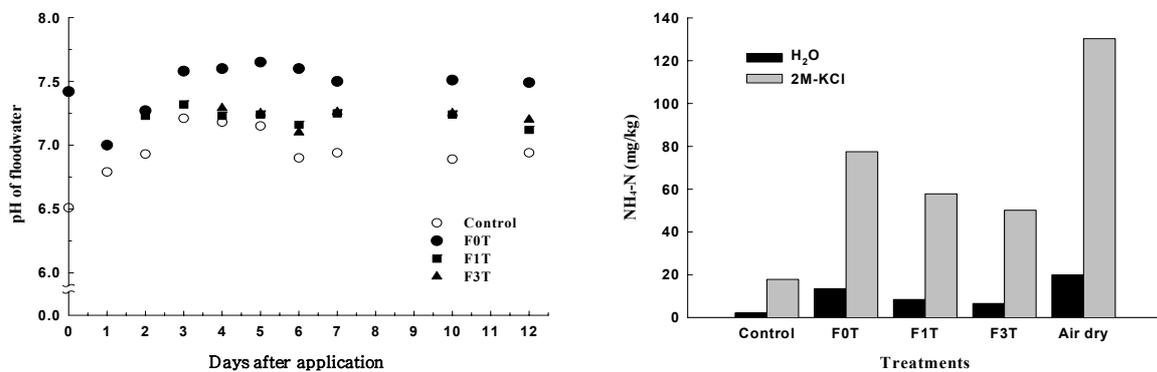


Fig. 7. Changes of pH in floodwater and NH₄-N content in surface soil at 12 days after liquid manure application.

암모니아 휘산은 pH에 크게 영향을 받는다. 일반적으로 pH 7.0 에서 암모니아 휘산은 시작되고 pH 7.5가 넘으면 급격히 증가한다. 본 연구에서도 F0T의 경우 사용초기 담수 중 pH가 7.4로 암모니아 휘산을 조장시켰다. 이와 같이 F0T 처리구의 높은 pH와 암모니아태 질소 함량 유지는 암모니아 휘산으로 호조건으로 작용해서 F1T F3T 처리구보다 암모니아 휘산량이 훨씬 높았다. F0T 처리구의 초기 pH 증가는 돈분 액비의 높은 pH에서 기인된 것으로 판단된다. 그리고 처리 후 1일차 담수 pH가 감소한 것은 급격한 암모니아 휘산으로 생성된 H⁺ 때문으로 보고 된 바 있다¹⁷⁾. 시험후 표층 3 cm 토양 중 암모니아태 질소 함량은 건토에서는 대부분 치환태 형태로 존재하는 것으로 나타났다. 그리고 치환태 암모니아 함량이 F1T, F3T에서 F0T 보다 높은 것은 담수과정에 유리 암모니아가 3 cm 밑으로 이동하였기 때문인 것으로 생각 된다 (Fig. 7).

4. 요약

대기 중으로 휘산 되는 대부분의 암모니아는 농경지에 사용하는 가축분뇨, 퇴비 및 질소비료에서 유래하며, 휘산된 암모니아는 강하 (Deposition)를 통해서 자연생태계의 산성화를 초래하고 수계의 부영양화를 유발하는 원인물질로 작용한다. 본 연구에서는 돈분뇨 및 퇴비 사용방법에 따른 암모니아 휘산량을 정량적으로 평가하였다. 돈분퇴비 표층살포 (SA), 표층살포 후 즉시 경운

(IRA), 표층살포 3일후 경운 (RA-3d) 처리구의 13일동안 암모니아 휘산량은 각각, 28.7, 8.7, 24.3 kg N/ha 로 IRA 처리구는 SA 처리구에 비해 약 70% 저감효과를 가져왔다. 돈분 액비 표층 살포 후 즉시 경운은 무경에 비해 봄과 가을 각각 26, 50% 의 암모니아 휘산량 저감 효과가 있었다. 그리고 수분 함량에 따른 암모니아 휘산량은 수분 함량이 높을수록 건조 토양에 비해 증가 하였다. 돈분 액비 시용 전후 담수 조건에 따른 암모니아 휘산량은 담수 상태에서 액비를 사용하는 것이 건조에 액비 살포 1일 후 담수 보다 약 4.7배의 암모니아 휘산량 증가가 있었다.

5. 사 사

본 연구는 2007-2008년도 국립농업과학원 박사후연수과정 지원사업에 의해 이루어진 것임.

6. 참고문헌

- Bobbink, R., Heil, G. W. and Raessen, M. B. (1992) Atmospheric deposition and canopy exchange processes in heartland ecosystems, *Environ Pollut.* 75, 29-37.
- Gundersen, P. and Rasmussen, L. (1990) Nitrification in forest soils: effects from nitrogen deposition on soil acidification and aluminum release, *Rev. Environ. Contam. T.* 113, 1-45.
- Fangmeier, A., Hadwigerfangmeier, A., Vandereerden, L. and Jager, H.J.. (1994) Effects of atmospheric ammonia on vegetation-A review, *Environ. Pollut.* 86, 43-82.
- van Aardenne, J.A., Dentener, F.J., Olivier, J.G.J., Klein Goldewijk, C.G.M. and Lelieveld, J. (2001) A 10 x 10 resolution data set of historical anthropogenic trace gas emissions for the period 1890-1990, *Global Biogeochem. Cycles* 15, 909-928.
- Misselbrook, T.H., Vander Weerden, T.J., Pain, S.C., Jarvis, B.F., Chambers, B.J., Smith, K.A., Phillips, V.R. and Demmers, T.G.M. (2000) Ammonia emission factors for UK agriculture. *Atmospheric Environ.* 34, 871-880.
- Sommer, S. G. and Hutchings, N. (1995) Techniques and strategies for the reduction of ammonia emission from agriculture, *Water Air Soil Poll.* 85, 237-248.
- Smith, K. A., Jackson, D. R., Misselbrook, T. H., Pain, B. F. and Johnson, R. A. (2000) Reduction of ammonia emission by slurry application techniques, *J. Agri. Engng. Res.* 77, 277-287.
- Meisinger, J. J., Lefcourt, A. M. and Thompson, R. B. (2001) Construction and validation of small mobile wind tunnels for studying ammonia volatilization, *Appl. Eng. Agric.* 17, 375-381.
- Klaasen, G. (1994) Options and costs of controlling ammonia emission in European, *Rev. of Agric. Econ.* 21, 219-240.
- Hayashi, K., Nishimura, S. and Yagi, K. (2006) Ammonia volatilization from the surface of a



- Japanese paddy field during rice cultivation, *Soil Sci. and Plant Nutri.* 52, 545-555.
- Misselbrook, T. H., Smith, K. A., Johnson, R. A. and Pain, B. F. (2002) Slurry application techniques to reduce ammonia emissions: results of some UK field-scale experiments, *Biosyst. Eng.*, 81, 313-321.
- Atia A. (2008) Ammonia volatilization from manure application. <http://www.thecattlesite.com/articles/1387>.
- Sommer, S. G. and Sherlock, R. R. (1996) pH and buffer component dynamics in the surface layers of animal slurries, *J. Agric. Sci.*, 127, 109-116.
- van der Molen, J., Beiljaars, A. C., Chardon, W. J., Jury, W. A. and van Faassen, H. G. (1990) NH₃ emission from arable land after application of cattle slurry, 2. Derivation of a transfer model, *Neth. J. Agric. Sci.*, 38, 239-254.
- Beauchamp, E.G., Kidd, G.E. and Thurtell, G. (1982) Ammonia emission from liquid dairy cattle manure in the field, *Can. J. Soil Sci.* 62,11-19.
- Gordon, R. and Schuepp, P. (1994) Water-manure interactions on ammonia emission, *Biol. Fertil. Soils* 18, 237-240.
17. Sommer, S.G., Genermont, S., Cellier, P., Hutchings, N.J., Olesen, J.E. and Morvan, T. (2003) Processes controlling ammonia emission from livestock slurry in the field, *Europ. J. Agronomy* 19, 465-486.