

양돈 퇴, 액비의 수질환경 영향분석을 위한 영양물질 이동경로 연구

어 성 욱*⁺

Nutrients Transport Pathway for Watershed Impact Analysis of Livestock Wastes and its Resources

Oa, Seong Wook*⁺

요약 : 액비와 퇴비 형태로 발생되어지는 양돈 분뇨는 발생량의 대부분이 농지에 적용되어지고 있다. 과잉으로 적용된 양돈 퇴, 액비는 수계의 영양소 과잉의 주원인으로 알려지고 있는데 양돈 퇴, 액비의 질소, 인 물질이 농지로부터 지표수와 지하수로 전달되어지는 경로를 파악하는 것이 본 연구의 주목적이다. 인공 강우 시험을 통해 농지로부터 양돈 퇴비와 액비가 각각 적용되어진 농지에 대해 지하수와 지표수로 유출되는 양을 조사하였는데 질소의 경우 지하수로 유출되는 부분이 가장 많은 반면 인의 경우 토양에 흡착되는 부분이 가장 많은 것으로 나타났다. 토양에 대한 인의 평균 흡착 양은 21.5 mg P/kg soil 로 나타났다.

핵심용어 : 퇴비, 질소, 인, 액비, 표면유출

Abstract : Liquid fertilizer and composted cattle manure were applied to an agricultural land. This study was conducted to find the pathway of the nutrients transport. Nitrogen concentration was decreased by the repeatable precipitation in surface runoff, but the nitrate concentration in ground water was gradually increased by biological metabolism, especially with pig liquid fertilizer. Phosphorus was mostly adsorbed into the soil, and its reduction was affected by the soil drain by surface runoff in the summer. Averaged adsorption capacity of the phosphorus via Jar-test was determined as 21.5 mg P/kg of soil.

keywords : *Compost; nitrogen; phosphorus; pig liquid fertilizer; surface runoff*

1. 서 론

우리나라의 양돈분뇨 처리 방식은 전체 발생량의 90% 이상이 퇴, 액비로 전환되어 농지에 비료로 이용되고 있다. 80년대 이후 가축 사육은 농가 부업식의 방법에서 전업농과 기업농 위주로 전환되었으며, 또한 밀식 사육에 의해 단위 농가당 사육두수가 크게 증가하고 있는 실정이다. 2011년 현재 국내 양돈 사육두수는 약 750만두에 이르는데, 이는 지난 구제역 발생 당시 집단 살 처분에 의해 감소된 후 다시 급격히 증가

하고 있는 실정이다. 양돈분뇨를 퇴, 액비로 처리하기 위해서는 적정 규모의 초지 및 농지를 확보하여야 하나(환경부, 2011) 농지 면적이 한정적인 우리나라의 특성상 이 규정이 잘 지켜지지 않고 있는 것이 현실이기도 하다. 우리나라 대표적인 양돈단지가 소재하고 있는 전라북도의 경우 현재 사육되고 있는 돼지의 분뇨를 액비로 모두 전환할 경우 전라북도 전체 농지의 130% 가량이 소요 되는 것으로 나타나고 있다. 공동정화처리 시설의 추가적인 확보와 적정 사육규모의 산정을 통해 과잉 영양물질이 농지를 통해 수계로

* 정희원 · 우송대학교 철도건설환경공학과 · 교수 · swoa@wsu.ac.kr

유입되는 것을 차단하여야만 하천 및 호소 등지의 수계에 대한 부영양화 대책이 될 수 있을 것이다. 최근의 양돈 퇴, 액비는 식물 성장을 위해 필요한 비료라기보다는 가축분뇨의 처분장으로 농지가 활용되는 상황이 발생하기도 한다. 이 경우 악취 등에 의한 민원 발생으로 제재가 되기도 하지만 대부분의 경우는 인지하지 못하는 가운데 토양에 축적되어 있다가 강우 시 하천 및 지하수로 유출되고 있으며, 하천 및 호소 부영양화의 주원인이 되고 있다(Little 등, 2005). 수계의 수질 관리를 가장 어렵게 하는 비점오염물질의 많은 부분이 농업분야의 유출이며, 우리나라 농촌 지역에 대한 환경부의 천층 지하수 조사결과를 보면 조사 대상의 30% 이상이 음용수기준을 초과하고 있는 것으로 보고되었는데(환경부, 2003), 기준 초과 시료의 대부분이 질산성 질소에 의한 것으로 나타나고 있다. 이제까지의 축산지역에 대한 오염 발생은 점오염원 및 강우에 의한 표면 유출로 한정하였으나 지하수로 유출되는 부분을 무시할 수 없는 상황이다. 일반적으로 농작물 재배를 위한 비료의 주입량은 인보다는 질소가 더 크게 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다(Sharpley 등, 2001). 비료로 사용된 질소 성분은 용존상태로 존재하는 비율이 높으나, 인의 경우는 토양에 흡착되어, 대부분의 농지에서 축적되는 것으로 알려지고 있다. 강우시 토양 침식에 의해 유출되는 영양물질은 질소 보다는 인이 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 또한 농지에 주입되는 가축분뇨 비료의 종류에 따라서 그 유출 특성이 변화하는 것으로 알려지고 있다 (Kleinman 등, 2002, 이병수 등, 2008). 본 논문은 현재 농지에 주입되고 있는 양돈 퇴비와 액비내의 영양물질이 강우 시 수계에 유입되는 특성을 알아보기 위해 실험실과 현장에서 수행한 연구결과를 나타낸 것이다. 현장 실험에서는 인공강우 실험을 통해 퇴, 액비 내 영양물질의 표면유출량과 지하수 유출량을 분석하였으며, 실험실 실험에서는 질소와 인의 토양 흡착 및 유출 정도를 분석하여 현장 실험의 기초자료를 도출하였다.

2. 실험 방법

2.1 현장 시험

시험구역은 충북 옥천군 소재 농지에 설치하였는데, 시험구는 퇴비적용구역(CM), 액비적용구역(LF) 및 대조구로 사용된 표준구역(ST)으로 각각 나눠 설치되었다. 각 구역은 5m x 11m 크기로 설치하였으며 각 구역간의 간섭을 피하기 위해 각각 5m의 간격을 두었다. 또한 각 구역측면에는 표면유출수의 포집을 위해 1.7~2.3°의 U형 측구를 설치하였고, 각 구역별 지하수 관측을 위해 직하단에 관측정을 각각 설치하였다. 인공 강우 시험은 30분 이내의 단 시간에 실시하였으며, 표면 유출량을 제외한 전량이 지하수로 유출되는 것으로 가정하였다. 현장 시험은 2월부터 10월 까지 8개월간 실시하였는데, 적용된 인공강우는 강우강도를 9~30.4 mm/hr로 하였으며, 강우 후 단기관찰은 24시간 동안, 장기 관찰은 1주 간격으로 1개월간 실시하였다. 인공강우 후 표면 유출유량을 측정하였으며, 표면 유출수와 지하수 시료에 대해 시간별 COD, TSS, TN, TP, NO₃-N 과 PO₄-P의 분석을 실시하였다. .

2.2 적용된 퇴, 액비의 특성

실험에 사용된 퇴, 액비는 인근의 양돈 농가에서 발생하는 것을 사용하였다. 퇴비는 비육우 사육 농가에서 발생한 것을 퇴비단 방법으로 제조한 것이며, 액비는 호기성 액비 저장 탱크에서 만들어진 것을 사용하였다. 각각의 시험구에 주입된 양은 EU의 질산염 관리령 기준에 따라 기존에 비료가 적용된 적이 없던 지역에 해당하는 210 kgN/ha/yr의 양을 기준으로 산정하여 주입하였는데, 퇴비의 경우 900 kg/50m² 이 주입되었고 액비는 1,200 L/50m² 만큼 주입되었다. 퇴, 액비는 주입 당시 초기 농도로 COD, TN 및 TP 항목을 분석하였는데, Table 1은 본 실험에 적용된 퇴, 액비의 성상을 보여주고 있다.

Table 1 The characteristics of applied liquid fertilizer and cattle manure

	COD	Total nitrogen	Total phosphorus	pH
Liquid fertilizer (mg/L)	21,600	2,010	306	8.12
Cattle manure (mg/kg)	90,400	5,950	3,459	8.07

2.3 토양의 흡착능 시험

Jar-Test로 토양의 인에 대한 흡착시험을 실시하였다. 인의 초기농도를 0.05 to 2 mg/L로 한 가운데 실온에서 토양 50 g에 PO_4^{3-} 용액 100 mL 씩을 250mL Erlenmeyerflask에 주입하여 실험을 수행하였다. Flask 는 100 rpm 으로 3 분간 급속혼합 후 40 rpm 완속교반 15 분, 그리고 20 분간 정치, 침강시켰다. 침강된 용액은 0.45 μ m membrane filter를 이용하여 여과 후 인 농도를 분석하였다. 동일한 토양에 대해 액비 용액을 적용하여 실험을 수행하였는데 이때는 액비 300 mL에 대해 토양의 양을 100, 150, 200, 250, 300 g으로 변화시키며 실험을 실시하였다.

2.4 토양 및 지하수 시료 채취

시험 전 초기 토양의 특성을 파악하기 위해 시험구의 토양 시료를 채취하여 시료를 분석하였는데 지표 토양 (지표 하 20 cm)을 채취하여 분석하였다. 지하수 시료 채취를 위해 관측정을 설치하였는데 관측정은 직경 150 mm 원형관으로 7m 깊이로 설치되었다. 시료 채취시 매번 5 L정도의 시료가 채취되었으며 시료채취를 위해 정량 펌프(Model 77600-62, Master Flex)를 사용하였다.

2.5 분석

모든 액체 시료에 대하여 TOC (Walkey-Black method), TN (Kjeldahl method), 그리고 TP (Ascorbic acid method 880 nm using UV-1601 Spectrophotometer, Shimadzu)항목을 분석하였는데 그 외의 분석은 모두 Standard Method (APHA, 1999)에 준하여 수행하였다. NH_4-N , NO_3-N , NO_2-N , 그리고 PO_4-P 는 Ion Chromatograph (DX-120, DIONEX)를 이용하여 분석하였다. 채취된 액체 시료들은 0.45 μ m 크기의 여과지로 여과한 후 기기 분석을 수행하였다. 또한 토양시료에 대하여는 토양화학공정시험법에 준하여 pH (Cole-Parmer), TOC, TN (Kjeltec 2100 DISTILLATION UNIT) 과 TP를 분석하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 토양 및 퇴, 액비의 특성

현장 시험구 시험에 사용된 토양은 주로 실트질과 사질토로 구성되어 있는 것으로 나타났는데 AQTESOVE model (Bouwer and Rice, 1976)을 이용한 토양의 투수계수 측정결과 표준 구역(ST)은 $2.86 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$, 퇴비 구역은 $2.43 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$, 액비 구역이 $5.25 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로 나타났다. 각 현장 시험구역의 토양 특성은 가축분뇨 자원화물을 적용하고 작물 재배 전과 재배가 종료된 후에 각각 분석을 실시하였다. 토양의 분석결과를 Table 2에 나타내었는데 작물 재배를 통해 액비 적용 구역에서는 총질소의 58.4%, 총인의 56.6%가 감소하였으며, 퇴비적용 구역에서는 총질소의 51.7%, 총인의 28.9%가 감소하였다. 두 구역을 비교할 경우 총인의 감소량은 비슷한 반면 잔류량에서 차이를 보이고 있는데 이는 퇴비 내 총 인 함량이 상대적으로 높기 때문인 것으로 분석되고 있다.

Table 2 Nutrients variation in Soil with cultivation

Nutrients	Liquid fertilizer applied(mg/kg)		Cattle manure applied(mg/kg)		Standard area(mg/kg)	
	before cultivation	after harvest	before cultivation	after harvest	before cultivation	after harvest
Total Nitrogen	225	93.6	385.5	186.2	51.2	33.8
Total Phosphorus	36.4	15.8	95.3	67.8	19.3	16.2
PO ₄ -P	11.2	3.6	21.3	14.8	3.2	1.9

3.2 강우에 의한 영양물질의 유출

현장 시험구에서 약 8 개월간 인공 강우에 의한 시험을 통해 가축 분뇨 퇴, 액비의 영양물질 이동현상을 분석하였다. 표면 유출에 의한 농도 변화를 Fig. 1 에 나타내었으며, 지하수에서의 질산성 질소 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. 액비 구역에서 표면유출수의 질소 농도는 실험 시작 후 급격히 감소된 반면 지하수에서의 질산성 질소 농도는 지속적으로 증가하는 양상을 보이고 있다. 퇴비 구역에서는 표면유출수의 질소농도가 상대적으로 서서히 감소되는 양상을 보이고 있으며, 지하수의 질산성질소는 7 ~ 8 mg/L 정도로 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 퇴비를 구성하는 질소성분은 주로 유기성 질소로 토양 매질 층을 통과하는 정도와 질산성 질소로의 분해도가 액비에 비해 매우 느리게 진행되는 것을 알 수 있다. 표면 유출수의 총인 농도는 하절기에 급격히 높아지는 것으로 나타나고 있는데 유사한 강우 정도의 인공강우 시험에서도 같은 정도의 인 유출을 보여주고 있다(김진호 등, 2008). McDowell 과 Sharpley (2002)는 토양수가 P의 이동에 영향을 준다고 보고하였는데, 강우 시 표면 유출수의 SS 농도는 액비구역과 퇴비 구역에서 각각 316 mg/L ~1,025 mg/L까지 변화하며 유출되는 것으로 나타났다. 지하수에서 인은 질소에 비해 영향이 적은 것으로 나타나고 있는데 질소성분과 달리 생물학적 반응보다는 토양에 흡착되어 지하수로는 거의 유출되지 않는 것으로 나타나고 있다. 농지

에 주입된 대부분의 인은 토양 내에 잔류하는 것으로 나타나고 있는데 (액비구역 51%, 퇴비구역 60%), 토양에 흡착된 인은 SS 성분의 표면 유출 시 함께 수계로 유출되는 것으로 알려지고 있다 (Oa, S. W. and Jun, H. D., 2010). 본 실험 결과에서도 인 유출농도는 고형물의 유출량과 관계가 있는 것으로 사료된다. Fig. 3에 보여진 것과 같이 고형물질 유출량과 유출 인 농도는 밀접한 관계를 보여주고 있는데, 이는 Udawatta 등 (2001)의 연구결과와 매우 유사한 양상을 보여주고 있다.

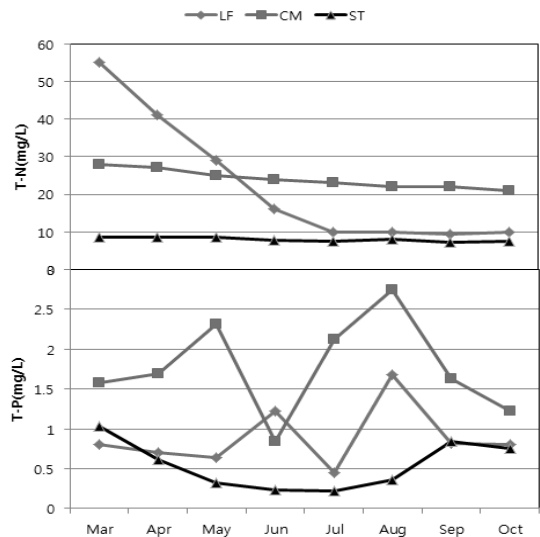


Fig. 1 Total nitrogen and phosphorus concentrations in surface runoff at each field site (ST: standard; LF: liquid fertilizer; CM: cattle manure)

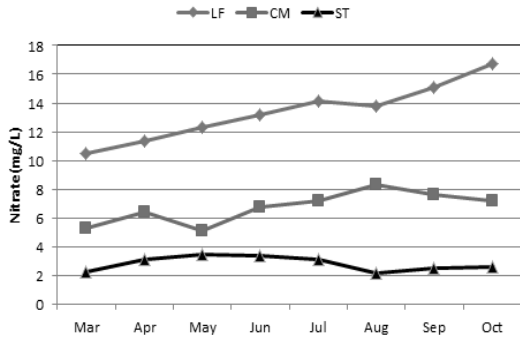


Fig. 2 Nitrate concentrations in ground water at each field site (ST: standard; LF: liquid fertilizer; CM: cattle manure)

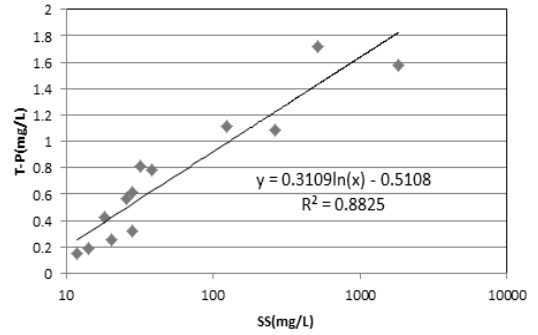


Figure 3. Phosphorus losses versus suspended solid by surface runoff

3.3 토양의 인 흡착 특성

토양에 대한 인의 흡착특성을 파악하기 위해 PO_4^{3-} 표준용액을 이용하여, 현장 실험 지역의 토양을 이용한 흡착 실험을 수행하였는데, Freundlich isotherm 으로 나타낸 흡착 모델 수행 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 최대 흡착 제거율은 82% 이며, 토양의 최대 흡착능은 $2.5mgPO_4^{3-}/kg$ 인 것으로 나타나고 있다. Ye et al.,(2006)에 의하면 토양의 인 흡착능은 pH가 높아질수록 점차 증가하는 것으로 보고하였는데, 본

실험의 pH 는 6.7로 pH 영향은 무시할 만한 구간이다. 토양에서 질소 성분은 대부분 용존 형태로 존재하여 쉽게 유출되는 반면, 대부분의 인은 토양에 흡착되는 것으로 나타나고 있는데(어성욱, 2010), 최대 흡착능을 보이는 인의 평형 농도는 1.3mg/L 인 것으로 나타났다. 양돈 액비를 적용한 토양에 대한 인 흡착실험결과를 Fig. 5에 나타내었는데, 액비의 초기 인 농도는 102.7 mg/L 였으며, 평균 흡착량은 21.5mgP/kg soil 로 나타나고 있다. 300g의 토양 적용시 액비중 인의 최대 제거율은 60%로 나타나고 있다.

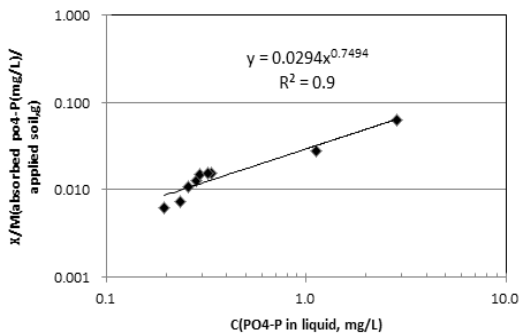


Fig. 4 Phosphate adsorption model with Freundlich isotherm

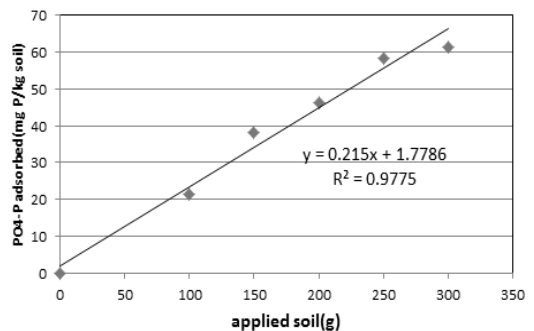


Fig. 5 Adsorption capacities for liquid fertilizer at different g of soil

4. 결 론

현장 시험을 통해 인공강우를 반복할수록 액비 구역에서 표면 유출수의 질소농도는 감소되는 반면 지하수에서의 질산성질소 농도는 증가되는 경향을 관찰할 수 있었다. 농지에 적용된 가축분뇨 자원화물의 인 성분은 토양에 흡착되는 부분이 가장 많았으며, 흡착된 인은 주로 강우시 부유물질의 유출에 의해 수계로 전달되는 것으로 밝혀졌다. 농지에 가축분뇨 자원화물을 사용할 경우 투수계수 등의 토양 특성, 지하수 오염정도 등이 면밀히 검토된 후 적용되어야 할 것이며, 적절한 농도와 양의 농지 적용이 농경지 주변 수질 환경의 적절한 관리를 위해 고려되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

김진호, 한국헌, 이종식, 2008. 농촌유역의 강우 사상별 농업 비점원 오염물질 유출특성. 수질보전 한국물환경학회지, 24(1): 69-77.

어성욱 2010. 가축분뇨 비료의 농지 유출 특성, 수질보전 한국물환경학회지, 26(5): 775~780.

이병수, 정용준, 박무종, 길경익, 2008. 경안천 유역 농촌지역의 비점오염원 배출특성에 관한 연구. 수질보전 한국물환경학회지, 24(2): pp. 169-173.

환경부, 2003. 2002년도 지하수 수질측정망 운영 결과.

환경부, 2011. 가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 시행규칙.

APHA. 1999. Standard Methods 20th Ed.

Bouwer, H. and Rice, R. C. 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Wat. Res. Research, 12(3): 423-428.

Kleinman, P. J. A., sharply, A. N., Moyer, B.

G. and Elwinger, G. F. 2002. Effect of mineral and manure phosphorus on runoff phosphorus. J. Environ. Qual. 31: 2026-2033.

Little, J. L., Bennett, D. R. and Miller, J. J. 2005. Nutrient and sediment losses under simulated rainfall following manure incorporation by different methods. J. Environ. Qual. 34: 1883-1895.

McDowell, R. W. and Sharpley, A. N. 2002. The effects of soil carbon on phosphorus and sediment loss from soil trays by overland flow. J. Environ. Qual: 32, 207-214.

Oa, S. W. and Jun, H. D. 2010. Nutrient Impact on the Bocheong Watershed by Application of the Treated Animal Waste. Desalination and Water Treatment: 19(1), 1-10.

Sharpley, A. N., McDowell, R. W. and Kleinman, P. J. 2001. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. Plant and Soil. 237: 287-307.

Udawatta, R. P., Motavalli, P. P. and Garrett, H. E. 2004. Phosphorus loss and runoff characteristics in three adjacent agricultural watersheds with claypan soils. J. Environ. Qual. 33: 1709-1719.

Ye, H., Chen, F., Sheng, Y., Sheng, G. and Fu, J. 2006. Adsorption of phosphate from aqueous solution onto modified palygorskites. Separation and Purification Tech. 50: 283-290.

- 논문접수일 : 2011년 09월 09일
- 심사의뢰일 : 2011년 09월 12일
- 심사완료일 : 2011년 11월 01일