

축산분뇨 농지환원을 위한 적정관리방안

Development of Guidelines for Animal Waste Land Application to Minimize Water Quality Impacts

홍 성 구*

Hong, Seong Gu

Abstract

Land application of manure compost is considered one of the widely-used animal waste management practices. Many livestock farms adopt composting for their animal waste disposal and apply the compost to crop fields. While standard rates have been established based on researches with respect to land application of manure compost recently, there have been few discussions on water quality impact of the application. Water quality impact should be taken into account in land applications of manure compost. In this study, management practices were proposed based on the investigation of water quality of leachate from manure compost under rainfall simulation, field studies, and monitoring runoff water quality from farm fields after land application of animal waste. The concentrations of major water quality parameters of the leachate were significantly high, whereas those of runoff from soils after tillage for soil incorporation, were not affected by the application based on a series of experiments. Runoff water from farm fields after land application also showed high concentrations of pollutants. Appropriate management practices should be employed to minimize pollutant loading from manure applied fields. Proposed major management practices include 1) application of recommended amounts, 2) proper tillage for complete soil and manure incorporation, 3) field management to prevent excessive soil erosion, 4) complete diversion of inflow into the field from outside, 5) implementation of vegetative buffer strips near boundaries, and 6) prevention of direct discharge of runoff water from fields into streams.

Keywords : Manure compost, Soil incorporation, Management practices, Rainfall simulation

I. 서 론

축산분뇨에 의한 수질오염문제가 심각해지면서 축산분뇨 처리를 위한 자원화방안이 적극적으로 채택, 적용되어오고 있다. 축산농가에서 설치한 축산분뇨 처리시설은 70% 이상이 자원화시설이고 나머지는 대부분 소규모 농가에서 설치한 간이축산폐

* 환경대학교 농촌학과
* Corresponding author. Tel.: +82-31-670-5134
fax: +82-31-675-0427
E-mail address: seongguc@hnu.hankyong.ac.kr

수 정화조이다(Choi, 1998). 특히 규모가 큰 허가 대상이나 신고대상의 축산농가에서는 자원화시설이 차지하는 비율이 더욱 높다. 자원화시설 중에서도 퇴비사나 톱밥축사 등과 같은 시설의 비율이 높다. 그러나 축산분뇨의 자원화에는 톱밥과 같은 부자재의 수급이나 가격상승 등의 문제점이 남아 있으며, 생산 및 유통상의 문제, 농지환원 과정상의 문제 등이 축산분뇨 처리를 위한 자원화방안에 걸림돌이 되고 있다(Yoo and Chung, 1996). 이 가운데 농지환원 과정상의 문제, 특히 수질문제는 인식이 낮은 실정이다. 국내에서는 최근에 이르러서야 가축분 퇴비의 적정시용량 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나(Cho et al., 1996; Cho et al., 1997; Song 1998; Song et al, 1997; Kim et al., 1997; Lee et al, 1996) 가축분 퇴비의 시용 후에 발생하는 2차 오염에 대해서는 연구가 미미하고 적정 시용량과 연계한 오염저감대책에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

축산분뇨의 농지환원은 좋은 유기성 비료로서 활용한다는 측면뿐만 아니라, 수질환경문제를 해결하기 위한 축산폐수의 적정처리라는 목적을 동시에 달성해야 한다. 축산분뇨의 농지환원은 비료자원이 부족해져서 아니고, 축산농가에서 발생하는 분뇨 및 폐수에 의한 수질오염문제를 해결하기 위한 방법의 하나로서 적용되는 것이다. 따라서 적정시용량에 대한 연구와 동시에 농지환원시 발생하는 수질오염문제를 체계적으로 평가하고 이에 대한 대책이 강구되어야 한다. 축산분뇨의 자원화기술 및 농지에 대한 적정 시용량이 충분히 정립되었다 하더라도 수질오염에 대한 고려가 미비할 경우 자원화 과정을 통한 농지환원은 원래의 목적을 상실하는 것이기 때문이다.

자원화 과정을 거쳐 만들어진 퇴비가 농지에 환원되는 과정에서 강우 발생시 유출수와 더불어 상당한 양의 오염물질이 수계에 유입, 수질문제를 야기할 수 있는 것으로 지적되고 있다(Kim et al., 1997). 미국과 같이 가용 농지가 충분한 나라에서

는 이와 관련해서 많은 연구가 진행되어 가축분 퇴비를 농지에 환원하는 경우 적정시기, 시용방법, 재배작물을 고려한 시용량 등에 대한 체계적인 연구와 가이드라인이 제시되어 있다. 그러나 우리나라의 경우 경지면적이 대부분 논으로 이루어져 있고 지형 및 기상 특성이 다르기 때문에 미국의 자료를 그대로 적용하기가 곤란하다.

축산분뇨를 농경지에 환원하는 과정에서 반드시 고려해야 할 사항은 시용량, 시용시기, 살포방법의 3가지로 볼 수 있다(Vanhorn, et al., 1993). 적정 시용량은 토양의 조건과 대상 농경지에 재배하고자 하는 작물의 종류에 의해서 결정된다. 시용시기는 토양에 잔류하여 작물에 최대한 이용될 수 있도록 분해속도 등을 고려하여 결정되어야 하며, 축산분뇨 살포방법은 크게 표면살포나 지표면 아래 혼입으로 나눌 수 있다. 미국에서는 오래 전부터 이와 관련된 연구가 체계적으로 정립되어, 현장에서 널리 적용되고 있다. 최근에는 축산분뇨를 살포한 후 발생하는 지하수와 지표수 오염을 억제하기 위하여 여러 가지 관리방안(Best Management Practices)들의 유효성평가에 대한 연구가 진행되고 있다. 일본에서는 한정된 농지면적을 고려하여 살포량을 극대화할 수 있는 방안을 모색하고 있으며, 이와 관련지어 하천수질에의 영향을 조사하는 연구들이 수행되고 있다.

국내에서는 축산분뇨의 적정처리방안으로서 톱밥 발효 등의 퇴비화방안이 상대적으로 쉽고, 수질문제를 해결할 수 있다는 인식 하에서 이와 관련된 연구와 현장적용이 활발해지기 시작하였다(Cho et al., 1996; Cho et al., 1997; Song 1998). 자원화 과정을 거친 퇴비의 소비를 촉진시키기 위하여 최근에는 축산분뇨의 적정 시용량에 대하여 연구가 시작되었으며, 이러한 연구의 결과는 농지환원에 필요한 기초자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

축산분뇨가 살포된 농지로부터의 오염물질 유출 부하에 대하여 Shin 등(1999), Kim 등(1997)이 조사한 바 있다. Shin 등(1999)은 혼파 조치에서

우분뇨 액비 사용수준에 따른 토양 및 유출수 중 수질에 대해 조사한 결과, 액비사용량의 증가에 따라 유출수량이 감소하며, 토양 중 유효인산 및 총 질소량은 화학비료를 사용한 토양에 비해 액비를 사용한 토양에서 높게 나타나고 있는 것으로 나타났다. Kim 등(1997) 또한 슬러리를 사용하는 경우 강우 유출시 질산성 질소를 제외한 영양염류의 부하량이 크게 증가하기 때문에 슬러리와 같은 축산분뇨는 우기를 피해 사용하여야 함을 지적한 바 있다. 그러나 축산분뇨의 농지환원과 연계한 오염물질의 유출 부하특성에 대하여 심도있는 논의가 없었다.

본 연구에서는 현재 우리나라에서 가축분 퇴비를 환원하는 과정에 있어서 수질오염물질 배출과 관련된 문제점을 파악하고, 가축분을 농지에 살포하는 농지에서 강우 시 발생하는 유출수에 의한 오염부하량 및 부하특성을 조사하여, 이를 토대로 농촌지역 수계 수질관리를 위한 축산분뇨의 적정환원 및 관리방안을 제시하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 축산분뇨 농지환원 현황 및 특성

수질오염물질 배출과 관련된 축산분뇨의 농지환원 과정상 문제점을 파악하기 위해서는 축분의 사용 현황에 대한 조사가 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 경기도 안성시 고삼저수지를 중심으로 한 지방도로 70번과 57번 도로 주변지역을 조사 대상지역으로 선정하였다. 현장조사에는 GPS 수신기와 항법용프로그램을 이용하였으며, 조사 내용으로는 축분 야적 농지의 수, 위치, 토양과 교반을 위한 경운시기, 농지의 종류, 사용량 수준, 하천과의 인접도, 축산농가와의 인접도 등을 조사하였다. 사용량 수준은 경운기, 트랙터, 트럭 등의 운반수단과 단위면적당 야적축분의 개수를 고려하여 소, 중, 대로 3가지로 분류하였다. 수질오염 가능성의 지표

로서 하천과의 인접도를 조사하였으며, 축산농가의 축분 처분과 관련된 의지 혹은 경향의 지표로서 환원농지와 축산농가와의 인접도를 조사하였다.

2. 농지환원과정의 오염부하 포텐셜

농지환원과정에서 발생하는 유출수에 의한 오염물질 배출부하특성을 조사하기 위하여 인공강우 조건하에서 오염물질의 농도변화, 축종별 축분으로부터의 평균농도 및 부하량을 조사하였다. 인공강우 조건하에서 오염물질 농도 및 부하량 조사는 야적된 축분의 침출수에 대한 조사와 토양과 혼합을 위한 경운작업 후의 지표 유출수에 대한 조사를 통해 수행하였다. 또한 관행적인 축분환원 조건에서 오염물질의 유출부하특성을 파악하기 위해서 경기도 이천시 모가면에 위치한 유역 내 축분환원 농지를 중심으로 강우시 시료를 채취하여 조사하였다.

조사 수질항목에는 COD, NO₃-N, TKN, TN, PO₄-P, TP, SS 등을 포함하였다. 수질분석방법은 공정시험방법 및 Standard Methods를 이용하였다. COD는 중크롬산칼륨을 이용하였으며, TKN은 적정법과 인도페놀법을 병행하였다. NO₃-N는 카드뮴환원법 및 이온크로마토그래피 이용을 병행하였으며, PO₄-P 및 TP는 몰리브덴산암모늄과 염화제일주석으로 발색시켜 분광광도계를 이용하여 정량하는 방법과 이온크로마토그래피법을 병행하였다.

가. 야적 우분의 침출수 수질특성

야적된 우분의 침출수 조사에서는 우분 야적량, 강우강도 조건을 달리하여 인공강우를 1시간 동안 발생시켜 시간에 따른 침출수량 및 항목별 농도 분석 등을 수행하였다. 강우지속시간에 따른 농도변화 분석에 초점을 두어 우분 자체의 성분은 분석하지 않았다. 실험에 이용한 인공강우발생장치는 Hong과 Lee(2001)에 기술된 바와 같이 살수분포에 대한 검정 후 적용하였으며, 제작된 인공강우발생장치의 가장 균등한 살수분포를 갖는 크기로 35

cm × 50 cm의 포트를 제작하였다. 야적량은 포트의 규모를 고려하여 3 kg과 6 kg로 설정하였으며, 강우강도는 살수분포를 고려하여 41 mm/h와 116 mm/h의 두가지 조건으로 결정하였다.

나. 축종별 평균농도 및 부하량

축종별로 침출수 중 오염물질 농도 및 부하량 조사는 인공강우 조건에서, 한우분, 유우분, 그리고 돈분에 대하여 실시하였다. 실험에 이용한 축분은 경기도 안성시 소재 축산농가로부터 얻은 것으로서 개별농가의 사육특성 등의 영향을 최소화하기 위하여 한우, 낙농, 양돈 각각 10농가에서 채취한 축분을 혼합하여 실험에 이용하였다. 한우분과 유우분은 톱밥발효사, 우분, 돈분은 기계식 발효사를 적용하고 있는 농가로부터 수집하였다. 인공강우 발생장치의 수정으로 인해 강우강도 조건은 65 mm/h와 94 mm/h로 하였다.

다. 경운 후의 유출수 수질조사

토양과의 혼합을 위한 경운작업 이후, 강우 유출시 유출수 중 오염물질의 농도와 부하량을 파악하기 위한 실험은 시용량, 강우강도, 지표경사 등을 달리하여 수행하였다. 실험을 위한 포트는 살수분포와 반복실험을 위하여 다소 작은 23.5 cm × 23.5 cm의 정사각형 평면으로, 깊이는 25cm로 제작하였다. 축분 시용량은 축분의 균질성을 확보하기 위하여 시중에서 판매하는 퇴비를 이용하였으며, 구입된 퇴비의 권장 시용량은 10 a당 800 kg였다. 이를 기준으로 면적 10 a에 경운 깊이 15 cm 조건하에 시용량 400, 800, 1200 kg으로 하였다. 조건별 시용량을 계산하여 양질사토(LS)토양과 혼합한 후, 포트에 동일한 조건에서 채웠다. 강우강도는 50과 100 mm/h의 조건으로, 그리고 지표면 경사는 적정량의 시료채취를 위하여 다소 높은 10%와 20%로 하고, 대조구를 포함하여 2반복 실험, 분석하였다.

라. 축분환원 농지로부터의 유출부하량

관행적인 영농조건인 축분환원농지로부터의 유출부하량 조사는 축분의 야적시기부터 환원 이후까지의 시기에 걸쳐 수행하였다. 조사된 농지는 사료용 옥수수를 재배하는 밭으로서, 분석을 위한 시료는 강우 시 현장을 방문하여 채취하였다.

Ⅲ. 축산분뇨의 농지환원 현황 및 오염물질 부하특성

1. 농지환원 현황 및 특성

농지환원 시기는 본격적인 영농이 시작되기 직전에 집중되는 것으로 조사된 바 있다.(Hong과 Lee, 2001). 2월부터 5월까지 약 10일 간격으로 대상 지역에 대하여 현장조사를 수행한 결과, 축분의 농지환원은 4월 초까지의 기간에 집중되는 것으로 나타났다. 동절기부터 4월 초까지의 시기에는 주로 축분을 농지로 운반, 야적한 상태에서 방치하였으며, 4월 중순 경부터 영농을 위하여 토양과의 혼합을 위한 경운작업이 본격적으로 시작됨을 알 수 있었다 (Fig. 1). 조사기간동안 관측된 축분야적 농지는 총 68개소이며, 이 외에 14개소의 임시저류를 위한 야적장을 발견할 수 있었다. 임시 야적장의 경우 대부분 축산농가에 인접하였으며, 2내지 4주 내에 농지로 운반되었다.

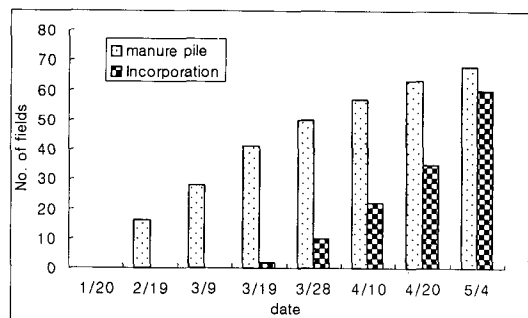


Fig. 1 Distribution of cumulative numbers of fields with manure piles and soil incorporation

조사된 지역의 축분환원 농지의 대부분은 밭으로서 85%를 차지하고 있었으며 나머지 15%는 논이었다. 축분환원 농지의 65%가 축산농가의 약 1 km 이내의 거리에 위치하였으며, 특히 축산농가에 바로 인접한 농지의 경우 축분처분 목적을 위한 것으로 이들 대부분은 단위면적당 사용량이 매우 높았다. 즉, 농지의 지력을 향상시키거나 시비보다는 축분의 처분에 목적을 두고 있음을 알 수 있었다.

축분퇴비 환원농지의 수질오염 가능성은 농지에 인접한 하천의 거리를 기준으로 그 위험도를 3단계로 나누어 분류하였다. 인접하천이 농지의 하류측 3 m 이내에 위치한 경우 높은 것으로, 3 m 이상의 가시거리 이내에 있는 경우 중간, 그 외의 경우는 낮은 것으로 구분하였다. 대다수의 경우 그 위험도가 낮거나 크지 않은 것으로 나타났다. 농지의 단위면적당 축분사용량은 경운기, 트랙터, 트럭 등의 운송수단을 근거로 야적된 축분의 개수를 기준으로 단위면적 당 사용량을 3단계로 구분하였다. 단위면적당 축분 사용량이 낮은 경우가 27%, 중간이 48%, 높은 경우가 25%로 나타났다. 단위면적당 사용량이 높은 농지는 대부분 사료용 옥수수를 재배하는 곳으로서 우분을 사용하는 경우였다.

2. 오염부하 포텐셜

가. 아적우분의 침출수 수질특성

강우지속시간에 따른 항목별 침출수의 수질 농도

변화를 살펴보면, 축분량이 동일한 조건에서 강우강도가 큰 경우 오염물질의 농도가 다소 낮아지거나 부하량은 침출수량의 증가로 증가하였다. 부유물질(SS)과 화학적산소요구량(COD)은 강우지속시간에 따라 농도가 점차 낮아지는 특성을 보인 반면, 총인(TP)과, 질산성 질소(NO₃-N)의 경우 시간에 따른 농도변화는 그 경향이 뚜렷하지 않았다. NO₃-N의 경우 강우종료 후, 배출되는 침출수 중 농도가 크게 증가하는 특징을 보였다. 강우지속시간에 따른 항목별 침출수의 수질 농도변화의 상세한 내용은 Hong과 Kim(2000)에 소개된 바 있다.

인공강우 발생기간 동안의 강우로 인한 항목별 유출부하량은 축분량의 증가와 강우강도의 증가에 따라서 NO₃-N을 제외한 모든 항목이 대체로 증가하였다. 축분량 및 강우강도 조건에 따른 침출수 중 항목별 농도의 범위는 Table 1에 나타난 바와 같다. 부유물질의 농도는 116 mm/h 조건에서 3 kg 포트에서는 10 ~ 57.5 mg/L로 나타난 반면, 6 kg 포트에서는 38 ~ 138 mg/L로 증가하였다. TKN 역시 116 mm/h 조건에서 6 kg 포트에서는 최고농도가 100 mg/L이상으로서 3 kg 포트의 최고치에 비하여 4배 이상으로 높았다. NO₃-N의 경우도 유사한 경향을 보였으나 강우강도가 41 mm/h인 경우에는 뚜렷한 차이가 없다.

나. 축종별 침출수 중 오염물질의 농도와 부하량

실험에 이용된 축분 가운데, 유우분의 경우 부분

Table 1 Concentrations of leachate for rainfall and animal waste amount conditions

Rainfall	116 mm/h		41 mm/h	
	3 kg	6 kg	3 kg	6 kg
Animal waste				
SS(g/L)	1.0~5.75(7.2*)	3.8~13.8(14.4*)	1.9~9.2(13*)	6.8~24.4(45.6*)
COD(mg/L)	72~599(47.5*)	571~1369(612*)	105~1158(2079*)	411~2070(1201*)
NO ₃ -N(mg/L)	1.97~7.64(27.5*)	3.01~9.03(28.6*)	6.46~9.95(25.7*)	1.28~10.8(36.7*)
TKN(mg/L)	1.29~23.5(23.6*)	1.15~106.9(20.4*)	5.86~47.1(22.7*)	7.12~102.1(52.8*)
TP(mg/L)	8.92~36.18(40.0*)	17.83~50.08(79.7*)	11.9~35.7(33.0*)	16.17~41.9(47.5*)

*: Concentrations of leachate collected after an hour rainfall simulation

Table 2 Comparison of leachate quality for different animal waste

	Cattle	Dairy	Hog
COD(mg/L)	410~1,050	830~2,735	4,260~13,155
SS(g/L)	44~82	160~244	176~494
TN(mg/L)	116~168	106~164	305~459
TP(mg/L)	32~48	28~45	69~86

적으로 생분에 가까운 형태의 고형물이 일부 존재하는 한우분에 비해 분의 비율이 상대적으로 높았다(Table 2). 실험에 이용된 축분은 별도의 성분 분석은 수행하지 않고 문헌에서 제시된 축분 및 청소수의 항목별 농도와 본 실험에서 얻은 결과와 비교하였다.

축중에 따른 부유물질의 농도를 살펴보면 돈분이 176~494 mg/L로 가장 높았고, 유우분이 160~244 mg/L, 그리고 한우분이 44~82 mg/L의 순으로 나타났다. 지금까지 알려진 축종별 부유물질의 농도는 일반적으로 돼지가 가장 높은 183 g/L, 한우분은 157 g/L, 유우분은 119 g/L이고, 축사 시설에서 발생하는 오수 중 부유물질 농도는 양돈 1,660 mg/L, 낙농 1,270 mg/L, 그리고 육우시설 1,230 mg/L 수준이다 (KASIT, 1990). 본 실험에서 야적상태에서 배출되는 침출수 중의 평균농도에 비해 훨씬 높음을 알 수 있다. 따라서 농지에 야적된 축분퇴비로부터 강우로 인한 침출수가 발생하는 경우 야적량, 야적상태 등에 의해서 다소 영향을 받을 수 있으나 축산농가에서 배출되는 오수 또는 청소수 수준에는 미치지 못하는 것을 의미한다.

축종별 TN은 한우분과 유우분이 비슷한 수준으로서 100~160 mg/L이었으나 돈분의 경우 약 2배 정도 높은 300~450 mg/L 수준으로 나타났다. 축종별 분의 TKN 농도는 한우분 6 g/L, 유우분 4.7 g/L, 돈분 9.8 g/L 수준으로서 (KAIST, 1990), 분의 농도와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. TP의 농도는 총질소와 마찬가지로 우분과 유우분은 경우 비슷한 수준으로 32~48 mg/L, 돈분의 경우 이보다 약 2배 높은 69~86 mg/L 로 나타났

다. 분의 TP는 한우 3.4 g/L, 유우 2.2 g/L, 돼지 4.2 g/L 수준이므로, 침출수 중 TP는 분의 TP 농도에 비해 약 1/50 정도로 나타남을 알 수 있다.

축분량과 강우강도의 증가에 따라서 오염물질 부하량은 증가하였다. COD의 부하량은 한우분, 유우분, 돈분의 순으로 높았다. TN과 TP는 한우분과 유우분간 큰 차이가 없는 반면, 돈분의 경우 2배 이상 높게 나타났다.

다. 경운 후의 유출수 수질조사

경운 후 지표면으로부터 강우시 발생하는 유출수 중 수질조사를 한 결과 강우강도, 경사, 그리고 퇴비시용량 조건에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 퇴비 시용량 조건인 10 a당 400, 800, 1200 kg은 포트 당 각각 22.1, 44.2, 66.3 g 으로서 그 양이 매우 적다. 또한 강우 유출수질에 직접 영향을 미치는 토층은 강우강도에 다소 영향을 미치지만 지표면에서 1 cm 내외이기 때문에 경운

Table 3 Surface runoff concentrations after tillage by different rainfall, slope, and animal waste application rates

Rainfall intensity	Slope	Application rate	COD (mg/L)	TKN (mg/L)	TP (mg/L)
50 mm/h	10%	Blank	17.0~31.0	0.09~0.15	0.63~0.77
		Low	28.0~85.4	0.09~0.77	0.60~0.70
		Medium	28.9~47.0	1.67~6.17	0.80~2.00
	20%	High	4.0~59.8	0.09~0.17	0.50~1.10
		Blank	5.0~30.0	0.09~0.67	0.78~6.24
		Low	30.0~168.4	0.13~0.66	0.71~2.11
100 mm/h	10%	Medium	9.0~24.5	2.67~7.00	0.74~4.66
		High	46.3~105.8	0.11~0.48	0.80~1.82
		Blank	28.3~84.5	0.17~0.29	0.83~1.57
	20%	Low	17.0~31.8	0.05~0.15	0.52~1.10
		Medium	23.5~42.4	0.30~0.33	1.00~2.05
		High	23.5~76.5	0.05~0.11	0.49~0.94
20%	Blank	12.0~45.3	0.17~0.33	1.09~1.51	
	Low	26.6~129.0	0.05~0.12	0.47~0.99	
	Medium	25.5~41.4	0.20~0.42	1.26~2.20	
		High	3.5~50.8	0.06~0.11	0.81~1.65

Blank : none, Low : 400kg/10a, Medium : 800kg/10a, High : 1200kg/10a

깊이 약 15 cm로 혼합된 본 실험조건에서는 시용량 조건이 수질에 거의 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. Table 3에 정리된 바와 같이 퇴비 시용을 하지 않은 대조구에서 오히려 다소 높은 농도가 나타난 경우가 있었으며, 시용조건에 따른 뚜렷한 경향은 없었다. 시용량이 적은 경우 표토면에서 부분적인 축분의 노출여부가 상대적으로 영향이 컸다고 판단된다.

3. 축분환원 농지로부터의 오염물질 유출부하특성

축산농가에서 사료작물을 재배하기 위해 축산분뇨를 사용하는 농지 4곳을 선정하여 강우 유출시료를 채취, 주요 오염물질의 농도를 조사한 결과는 Table 4에 요약한 바와 같다. 조사대상 농지 모두 사료용 옥수수를 재배하였으며, 비교적 큰 경사를 가지고 있다. F1 농지의 시료채취 장소는 상류측으로부터 비교적 맑은 유출수가 유입되며, 축산농가의 주변으로부터의 유출수를 포함하는 곳으로서 유량이 충분하여 5회의 시료채취가 가능하였다. 농지 F1에서의 COD는 77.8~191.5 mg/L 수준이었으며, 질산성 질소는 최고 약 120 mg/L까지 달했다. F2의 경우 300 mg/L 이상의 COD 농도를 나타내기도 하였으나, NO₃-N과 PO₄-P는 농지 F1에 비해 다소 낮은 값을 보였다. F3와 F4의 경우 시용한 우분량이 대단히 많아 다른 지역에서 강우유출이 발생하는 조건에서도 유출이 매우 적거나 거의 발생하지 않아 시료채취가 곤란하였다. 농지 F4는 유출수가 발생하지 않아 조사기간 동안에 시료를 전혀 채취할 수 없었다. 돈분을 시용한 F3에서 COD가 가장 높은 752 mg/L였으며, NO₃-N과 PO₄-P 또한 상당히 높은 3.11, 20.95 mg/L를 각각 나타냈다. 조사된 농지는 공통적으로 경운 이후에도 상당히 많은 양의 축분이 표면에 노출되어 있는 특징을 보였으며, 이로 인해서 유출수가 발생하는 경우 오염물질의 농도가 크게 증가한 것으로 판단된다.

Table 4 Farm field descriptions and results of sampling and water quality analyses

Field Id	Area (ha)	Application rate*(kg/10a)	No. of samples	COD	NO ₃ -N	PO ₄ -P
F1	1.2	4,000	5	77.8~191.5	5.81~119.8	1.78~2.7
F2	0.6	3,000	3	23.5~306.8	0.96~1.87	1.16~1.25
F3	0.7	4,000	1	752.0	3.11	20.95
F4	0.6	6,000	0	-	-	-

*: approximate values.

조사된 농지로부터의 유출수 중 COD 농도는 축분 침출수에 비해 낮으나, 앞에서의 경운 후 포트 실험 결과에 비해 높은 값을 나타내었다. 특히 돈분을 다량 시용한 농지의 경우 대단히 높은 농도를 나타내고 있기 때문에, 이에 대한 관리방안이 강구되어야 할 것이다. 한편, 축분을 다량 사용하는 경우 강우시 유출량이 현저히 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 축분퇴비가 갖는 보수력 뿐만 아니라 토양과 혼합된 후 저류공간을 제공하기 때문으로 판단된다. 특히 톱밥발효 퇴비는 많은 양의 톱밥이 포함되어, 보수력 증가로 인해 지표면에서의 유출수량이 크게 감소하게 된다.

4. 오염물질 유출부하특성의 분석 및 평가

현장조사를 통해 시기별 축분시용특성, 시용량, 축산농가와와의 거리 등에 대한 축분의 농지환원특성에 대하여 파악할 수 있었다. 시기적으로는 본격적인 영농기 이전에 축분을 농지로 운송하여 4월 중순 이후에 토양과 혼합을 위한 경운이 이루어짐을 알 수 있었다. 농지의 지력 향상이나 시비를 위한 목적보다는 축분의 처분을 위한 목적으로 축분을 농지에 사용하는 경향이 있었다. 축산농가 주변에 위치한 농지에서 단위면적당 시용량이 높아 강우 유출수가 발생하는 경우 고농도의 오염물질이 유출될 가능성이 컸다. 포트실험을 통해 축분을 야적한 상태에서는 강우시 대단히 높은 농도의 오염물질이 유출됨을 알 수 있었다. 특히 돈분의 침출수 수질

은 우분에 비해 현저히 높은 것으로 나타났다.

축분퇴비를 권장량 수준으로 사용하였을 때, 작물재배를 위해 경운작업 이후에는 오염물질 유출부하량이 크지 않음을 포트실험 결과를 통해 알 수 있었다. 포트실험 조건에서와 같이 사용량을 권장 사용량의 1.5배 이상으로 하더라도, 강우 유출수 중 오염물질의 농도가 대조구에 비해 큰 차이가 없었다. 물론 축분의 권장 사용량이 10a 당 1,000~5,000 kg으로서 포트실험에서의 사용량이 다소 낮으나, 토양과의 혼합을 위한 경운작업 이후에는 강우 유출로 인한 오염물질의 배출부하량은 크지 않다고 판단할 수 있다.

한편, 포트실험 결과와는 달리 사료작물을 재배하는 농지에서 강우 시 발생된 유출수 중 오염물질의 농도는 비교적 높게 나타났다. 단위면적당 사용량이 매우 높기 때문에 판단된다. 축분 사용으로 강우 유출수량이 현저하게 감소한 것은 사실이나, 일단 유출수가 발생하는 경우 표면에 노출된 축분량이 많아 오염물질의 농도가 크게 증가한 것으로 보인다.

IV. 오염부하량 저감을 위한 관리방안

1. 오염물질배출과 관련된 축분 시용상 문제점

축분과 토양의 혼합을 위한 경운작업 이전의 시기동안에 강우가 발생하여 야적상태에서의 축분으로부터 침출수가 발생하는 경우 오염물질의 농도가 대단히 높아 인접한 하천수질에 크게 영향을 미칠 수 있으나, 축분을 농지에 환원하는 시기인 연초부터 5월까지의 강수량이 많지 않아 강우 유출로 인한 오염물질의 유출부하 가능성은 크지 않다. 축분퇴비를 일부 과수 농가에서와 같이 강수량이 많은 시기에 사용하는 경우에는(Hong과 Lee, 2001), 적절한 관리가 이루어져야 한다.

축분퇴비의 운반과 관련된 문제점은 농가에서 축분퇴비를 반출하기 위해 임시로 야적한 장소가 하천에 인접한 경우 고농도의 침출수가 하천에 쉽게

유입되거나 부주의한 운반과정에서 적지 않은 양이 도로나 포장된 지역의 바닥에 떨어져 오염을 유발할 수 있다는 것이다. 많은 축산농가에서 근거리에 위치한 농가 소유의 농지에 축분퇴비를 사용하고 있기 때문에 오히려 부주의한 운반작업이 이루어지고 있다. 이웃한 경종 농가와 연계한 조직적인 농지환원이 이루어지고 있지 않는 점 또한 개선되어야 할 부분이다.

일단 농지에 운반된 축분은 토양과 혼합을 위해 지표면에 비교적 균등하게 살포되고 경운을 하게 되는데, 경운 이후에는 오염물질의 유출부하 가능성은 낮아짐을 알 수 있었다. 경운 이후의 시기에 강우 유출로 인한 오염물질의 유출부하 가능성은 축분의 사용량에 크게 영향을 미치게 된다. 특히 경운 후에 토표면에 다량의 축분퇴비가 노출된 상태에서 유출수가 발생하면 현장조사 결과에서와 같이 높은 농도의 오염물질이 배출된다.

본 연구에서 조사된 농지와 같이 경사가 급한 지역에서는 지표 유출수에 의한 토양침식력이 증가하여 토양 및 오염물질의 유출부하량이 증가하게 되는 문제점을 갖고 있다. 축분을 사용하는 다수의 농지는 밭으로서 어느 정도의 지표면 경사를 갖고 있다. 적절한 관리공법을 도입 또는 설치하여 유출수량과 부하량을 저감시켜야 할 것이다. 조사된 일부 농지에서는 상류측으로부터의 유입수가 적절히 우회 또는 배제되지 않는 문제점이 있었다. 농지환원 농지의 상류측으로부터 유입수가 있는 경우에는 유출량, 결과적으로 오염부하량을 증가시키는 결과를 초래한다. 상류측으로부터의 유입수에 대한 적절한 관리가 이루어져야 한다. 또한 대부분의 경우 축분이 사용된 농지에서 발생하는 유출수가 수로를 통해 직접 하천으로 유입되는 문제점을 갖고 있었다.

상기 현장 조사를 통해 파악된 축분의 농지환원 과정에서의 문제점은 Table 5와 같이 요약할 수 있다. 주요 문제점은 축분시용 시기, 축분의 운반, 사용량, 농지의 조건, 그리고 유출수의 관리 등으로 구분하여 정리하였다.

Table 5 Major problems in land application of animal waste to crop fields

Classification	Problems to be focused on in land application
Application timing	<ul style="list-style-type: none"> • Most application is made before mid-May, but some are even during the rainy season
Transportation of manure	<ul style="list-style-type: none"> • Inappropriate transportation increases loading from road and paved area • Inappropriate management of temporary storage of manure compost • Application is made on livestock farmers' own fields
Application rate	<ul style="list-style-type: none"> • Over-applications of manure compost in some farm fields • Residual solids of manure on soil surface after tillage • Large-size manure piles on field near stream
Field conditions	<ul style="list-style-type: none"> • Steep slope of farm fields • Excessive soil erosion • No management practices in fields
Runoff controls	<ul style="list-style-type: none"> • No or bare channels to divert inflows from upstream area • No buffer area for reducing pollutants in runoff from fields • Direct discharge of runoff from fields through grassed waterways

Table 6 Management practices for reducing pollutant loading with respect to animal waste application

Classification	Management practices
Application timing	<ul style="list-style-type: none"> • Application should be made during the period of no or less rainfall
Transportation of manure	<ul style="list-style-type: none"> • Appropriate transportation to prevent losses to road and paved area • Management of temporary storage to prevent leachate loading
Application rate	<ul style="list-style-type: none"> • Application of recommended amount of manure compost • Application after proper composting process to prevent manure consolidation • Enough and proper tillage to minimize residual manure solids on soil surface
Field conditions	<ul style="list-style-type: none"> • Reducing surface slope of fields • Adopting erosion control practices • Buffer area in field boundaries for reducing pollutant loading into streams
Runoff controls	<ul style="list-style-type: none"> • Prevention of surface water flow into fields • Adopting management practices for reducing runoff amount • Appropriate management of runoff water on fields • Prevention of direct discharge of field runoff into streams

2. 오염저감을 위한 적정관리방안

축분퇴비를 농지에 환원하는 시기는 주로 강수량이 적은 기간으로서, 오염물질 배출면에서는 긍정적으로 평가할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서 얻은 포트실험결과와 농지로부터의 유출수 수질조사를 검토해보면, 축분을 사용하는 농지에서 오염물질 배출부하를 저감시키기 위한 관리방안이 도입되어야 함을 알 수 있다.

축분을 농지로 운반하는 과정에서는 축분이 이동 과정에서 유실되지 않도록 하여야 한다. 임시 저장 시설이 필요하다면 그 곳으로부터 침출수의 발생을 최소한으로 줄이고, 농지로 운송이 완료된 후에는 축분이 남지 않도록 관리하여야 한다. 축산농가에서는 소유하고 있는 농지에 축분처리를 목적으로, 과다

하게 사용하는 경향이 뚜렷하므로, 주변의 경종농가와 연계한 농지환원 체계를 수립하는 것이 필요하다.

축분퇴비의 과다 사용은 유출수 중 오염물질의 농도를 크게 상승시키므로 철저히 방지되어야 한다. 경운 후에 토표면에 노출되는 축분이 최소화되도록 하는 것이 필요하다. 경운 후 축분이 토표면에 노출되는 정도는 사용량과, 축분의 성상과 밀접한 관계를 맺고 있음을 현장 조사를 통해서 알 수 있었다. 합수비가 높은 축분을 농지에 살포하면, 야적상태에서 건조되어 축분이 큰 덩어리로 응고되어 경운 작업에도 불구하고 쉽게 토양과 혼합되지 않으며, 표면에 잔류하게 된다. 따라서 적정한 양의

축분시용과 더불어 퇴비화 과정을 거쳐 충분히 부숙된 상태의 축분퇴비를 사용하는 것이 필요하다.

경사가 급한 농지에서는 지표 유출수의 유속이 증가하여 토양침식이 발생하고, 유출수와 작용하는 토층의 깊이가 증가하여 부하량이 증가하게 된다. 따라서 경사가 있는 농지에서는 토양침식 방지를 위한 공법과 유사한 관리공법을 도입하는 것이 필요하다. 상류측에서의 유출수가 유입되는 농지에서는 우회수로 등을 설치하거나 보강하여야 한다. 농지 내에서 발생하는 유출수가 수로나 주변 하천으로 직접 유입되는 것을 최소화하고, 오염물질 일부를 제거할 수 있는 완충공간을 만드는 것도 고려해야 할 것이다. 축분퇴비를 농지에 환원하는 과정에서 배출되는 오염물질량을 저감하기 위한 관리방안은 시용시기, 축분운반, 시용량, 농지조건, 그리고 유출수 관리 등으로 나누어 Table 6에서와 같이 요약할 수 있다.

V. 요약 및 결론

축산분뇨의 농지 환원시 수질오염물질 배출과 관련된 문제점을 파악하기 위하여, 농지환원 현황에 대한 조사, 축분야적조건에서 침출수 수질조사, 경운 후 유출수의 수질조사, 그리고 농지로부터 배출수 수질조사를 하였다. 농지환원 현황 및 현장조사 결과와 수질조사결과를 바탕으로 오염물질배출과 관련된 문제점을 파악하고, 이를 저감할 수 있는 관리방안을 모색, 정립하였다.

농지환원 현황에 대한 조사결과, 축분의 운반을 위한 임시야적이거나 운반과정에서의 유실이외에는 수질오염물질의 배출 가능성은 높지 않았다. 야적 상태에서 강우로 인해 발생하는 침출수의 오염물질 농도는 대단히 높으나, 경운작업이 이루어지는 시기까지의 동안은 비교적 강수량이 적어 축분의 농지환원 과정에서의 문제는 크지 않다. 임시 야적지나 운반과정에서 도로나 포장된 지역에서 유실되는 축분이 최소화되도록 하는 것은 필요하다고 판단된다.

축분을 시용하는 농지를 선정하여 강우시 유출수를 채취 분석한 결과, 야적된 축분으로부터의 침출수 수질에는 미치지 못하나, 권장시용량 수준에서 경운 후의 유출수 수질에 비해 높게 나타났다. 축분퇴비의 권장시용량 수준에서 경운 후 유출수 중 오염물질의 농도는 시용량, 강우강도, 표면 경사 등의 조건에 큰 차이가 없었으며, 축분퇴비를 처리하지 않은 대조구에 비해서 뚜렷한 차이가 없었다. 반면 농지로부터의 유출수 수질은 우분시용 농지에서는 최고 COD가 300 mg/L, NO₃-N은 100 mg/L, PO₄-P는 2.0 mg/L 이상으로 나타났으며, 돈분시용 농지에서는 COD 700 mg/L, NO₃-N은 3 mg/L, PO₄-P는 20 mg/L 이상으로 나타났다. 조사된 농지 모두 사료용 작물재배를 위해 비교적 과다한 양을 시용하고 있었으며, 경운 후에도 상당량의 축분이 토양 표면에 노출되어 있었기 때문에 높은 농도를 나타낸 것으로 판단된다.

본 연구를 통해서 파악된 문제점과 관리방안은 시용시기, 축분운반, 시용량, 농지조건, 그리고 유출수 관리 등으로 나누어 정리할 수 있었다. 축분퇴비를 농지로 운반하는 과정에서는 축분이 도로 등에 유실되는 것이 주요 문제점으로서 이를 위한 배려가 요청된다. 시용량은 권장량을 따라야 하며, 시용량이 많은 경우에는 경운과정에서 토양과 충분히 혼합이 되고 토양 표면위에 노출되는 양이 최소화 되도록 하는 것이 필요하다. 특히 부숙과정을 거치지 않아 함수비가 높은 토양의 경우 경운 후에도 훨씬 많은 양이 표면에 노출되기 때문에 적절한 퇴비화과정 후에 시용하여야 한다.

경사가 있는 농지에서는 토양유실을 최소화할 수 있는 관리공법이 도입되어야 하며, 상류측으로부터 유출수가 농지로 유입되지 않도록 우회수로 등을 정비하는 것이 요구된다. 농지에서 발생된 유출수가 인접한 수로나 하천으로 직접 유입되지 않도록 하는 것이 필요하며, 농지의 주변에 최소한의 식생대를 설치하는 것이 바람직하다.

“이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음 (KRF-99-041-G00003).”

References

1. Cho, K. R., K. D. Kim, C. K. and Park, S. E. Won, 1996. A study of recycling of animal waste : cattle manure compost application in dry paddies. *Experimental Report of Kyonggi Agricultural Research and Extension Service*, 465-469. (in Korean)
2. Cho, K. R, S. E. Won, and C. K. Park, 1997. A study of recycling of animal waste : cattle manure compost application in flooded paddies. *Experimental Report of Kyonggi Agricultural Research and Extension Service*, 596-599. (in Korean)
3. Choi, H. R., 1998. Present status of animal waste treatment technology in Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 40(2):18-28. (in Korean)
4. Hong, S. and J. T. Kim, 2000. Quality of Leachate from Manure Compost, In *Proceedings of the 2000 Annual Conference by the Korean Society of Agricultural Engineers*, 584-489. (in Korean)
5. Hong, S., and N. H. Lee, 2001. Assessment of pollutant loading potential during land application of animal waste. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, 43(1):66-74. (in Korean)
6. KAIST (Korean Advanced Institute of Science and Technology), 1990. *A Study on the Management of National Animal Waste*. (in Korean)
7. Kim, S. J., H. J. Kim, O. Tsuji, F. Tsuchiya, and W. S. Yo, 1997. Study on nutrient loss in surface runoff by rainfall from slurrigated area using digested animal manure. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 39(3):43-51. (in Korean)
8. Kim, J. K, H. H. Lee, S. Seo, J. H. Kwak, and H. J. Jin, 1997. Soil characteristics and yield performance of sorgham×sudangrass hybrid as affected by application of cattle manure compost. *Journal of Agricultural Science*, 39(1):50-55. Rural Development Administration. (in Korean)
9. Lee, J. S., K. W. Jang, S. H. Cho, and J. K. Oh, 1996. Effect of compost application on radish quality and changes of soil physico-chemical properties in organic farming. *Journal of Korean Soil Science and fertilizer*, 29(2):145-149. (in Korean)
10. Shin, J. S., H. H. Lee, J. W. Ryu, G. J. Choi, Y. W. Lim, W. H. Kim, K. Y. Kim, K. and J. Lee. 1999. Changes in soil physico-chemical characteristics and grass/legume productivity by application of hog slurry liquid. *Journal of Korean Aniaml Science*, 41(4):479-486. (in Korean)
11. Song, Y. S., B. R. Heo, H. K. Kwak, J. S. Seo, B. Y. Yun, and K. Y. Chung, 1997. A study on defining soil fertility: Standard application rates for soil conservation. In *Annual research and experimental report of National Institute of Agricultural Science and Technology*, pp.297-303. Rural Development Administration. (in Korean)
12. Song, Y. S., 1998. Manure compost application based on phosphorus contents. *Research and Extension*, 39(12):33-38. Rural Development Administration. (in Korean)
13. Vanhorn, H. H., R. A. Norstedt, A. V. Bottcher, E. A. Hanlon, D. A. Graetz, and C. F. Chamliiss, 1993. Dairy manure management: Strategies for recycling nutrients to recover fertilizer value and avoid environmental pollution. http://www.inform.umd.edu/EdRes/Topic/AgrEnv/ndd/watermgt/RECYCLING_NUTRIENTS_TO_RECOVER_FERTILIZER.html. Accessed 20 Feb. 1996.
14. Yoo, C. H and M. K. Chung, 1996. Strategy for animal waste recycling. *Agricultural Economy*, 19(3):157-175. (in Korean)