

깔개물질의 종류에 따른 한우-경종 결합 농가의 양분순환 구조 분석

임상선¹ · 박진협¹ · 박현정¹ · 이선일¹ · 이동석¹ · 김용순² · 윤봉기² · 김선우³ · 최우정^{1,4,*}

¹전남대학교 농업과학기술연구소 생물산업공학과, ²전남농업기술원,
³영암농업기술센터, ⁴전남대학교 친환경농업연구사업단

Analysis of Nutrient Cycling Structure of a Korean Beef Cattle Farm Combined with Cropping as Affected by Bedding Material Types

Sang-Sun Lim¹, Jin-Hyeob Kwak¹, Hyun-Jung Park¹, Sun-Il Lee¹, Dong-Suk Lee¹,
Yong-Soon Kim², Bong-Ki Yun², Sun-Woo Kim³, and Woo-Jung Choi^{1,4,*}

¹Department of Biosystems & Agricultural Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology,
Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²Jeonnam Agricultural Research & Extension, Naju 520-715, Korea

³Youngam Agricultural Technology & Extension Center, Youngam 526-821, Korea

⁴Environment-Friendly Agriculture Research Center, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

In this study, we analyzed nutrient cycling structure of a small farm (cattle of 100 heads and arable lands of 2.5 ha) in Jeonnam province to investigate the effects of nutrients input by the addition of bedding materials (sawdust and rice hull) and nutrients loss before the application to the soils (the period during manure storage in the feedlot and composting process) on nutrient cycling structure. Sawdust and rice hull added as bedding materials increased N by 1.6% and 14.2% and P₂O₅ by 3.1% and 27.4%, respectively, relative to the amount of nutrients produced by excretion. This result suggests that the addition of nutrients via bedding materials should be considered for better estimation of nutrient balance. The most significant characteristics of the nutrient cycling structure was loss of mass and nutrients during the storage (21 days) and composting period (90 days). During this period, 78.4% of N and 9.5% of P₂O₅ was lost from sawdust compost; meanwhile, the percentages of loss for rice hull compost were 81.6% and 10.3%, respectively. A lower percentage of nutrients loss in sawdust compost than that in rice hull compost was attributed to the relatively slow decomposition rate of organic materials in the sawdust compost which has higher C/N ratio and lignin contents. Therefore, it was concluded that estimation of nutrient balance should be conducted based on nutrient contents in the final compost being applied to the lands rather than the amount of nutrients contained in the livestock excretion. In addition, the effects of bedding materials on nutrient losses should be also taken into account.

Key words : Bedding material, Composting, Nitrogen, Nutrient balance, Phosphorus

서 언

농림수산물주요통계(MIFAFF, 2008)에 따르면 우리나라 전체 면적(997만 ha) 중 논과 밭의 비율은 각각 10.7%와 7.1%임에 비해 한우나 젓소를 방목할 수 있는 목장용지는 0.6%에 불과하다. 따라서 인위적인 시설물을 이용하여 가축을 사육하기 위한 축산시설기술이 발달하였고, 조사료에 비해 농후사료 형태의

배합사료 의존도가 증가하였다. 2007년 기준으로 한우와 젓소의 사육두수는 각각 2,201 천두, 453 천두 이고(MIFAFF, 2008), 농림부(MAF, 2000)에서 제시한 두당 일 발생 원단위(한우의 경우 분 11.4 kg 뇨 3.9 kg, 젓소의 경우 분 24.3 kg 뇨 10.2 kg)을 적용하면 연간 13,176,244 톤의 분과 4,819,642 톤의 뇨가 발생하는 것으로 계산된다. 가축분뇨는 적절히 처리되지 않고 하천에 방류될 경우 하천의 수질 악화는 물론 호소의 부영양화, 상수원 및 농업용수 오염, 악취 및 해충 피해 등의 원인이 될 수 있다(Larney et al., 2006). 반면, 분뇨는 유기물과 양분함량이 높기 때문에 호기적

접수 : 2008. 8. 20 수리 : 2008. 10. 5

*연락처 : Phone: +82625302153,

E-mail: wjchoi@chonnam.ac.kr

또는 혐기적 처리과정을 이용한 퇴비화를 통해 경종 작물 생산을 위한 비료로서의 이용 가치가 크다. 특히 퇴비는 경종과 축산이 연계하는 자연순환농업에서 가축 → 분뇨 → 퇴비 → 토양 → 사료 → 가축을 통한 양분순환 과정에서 분뇨와 사료를 연결시키는 중요한 고리이다(Larney et al., 2006).

자연순환농업은 다양하게 정의될 수 있지만, 넓은 의미에서 마을 또는 지역 내에서의 유기물의 완전순환을 통한 균형있는 물질수지를 유지시켜 생태계를 보전하고 안전한 농산물을 생산하는 농업으로 정의될 수 있다(Gao et al., 2006). 최근 지속가능한 농업의 일환으로서 자연순환농업에 대한 관심이 증대되고 있으며, 이에 상응하게 지역 내 또는 지역 간의 대단위 권역에서 가축두수, 분뇨발생량, 작물시비 요구량을 기준으로 한 양분순환모형에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다(Kim and Kang, 2002; Kim and Kim, 2003). 다양한 자연순환농업 단위 중 군 단위의 경우 양평군을 대상으로 농업생태계내 물질순환구조에 대한 연구가 진행된 바 있다(Kim, 2003; Hur and Park, 2006). 또한, 양분순환구조 분석을 통해 사료 작물의 인산 요구량을 기준으로 분뇨를 사용했을 경우 분뇨의 토양 환원량 또는 지역내 조사료 총 생산량을 근거로 단위 사료포장 면적 당 수용 가능 가축두수가 제안된 바 있다(Sim, 2005; Yoon, 2005).

하지만, 이와 같은 선행연구는 대부분 지역내 자연순환농업 모형을 대상으로 양분순환 구조를 분석한 반면, 자연순환농업 시스템의 기본 단위인 소규모 농가를 대상으로 한 양분순환 연구는 미흡하다. 또한, 퇴비화 과정에서 수반되는 양분 수치 변화(갈래물질 투입에 의한 양분의 추가 유입 및 퇴비화 과정 중 양분 손실)를 고려하지 않는 대신 발생 분뇨에 함유된 양분 전체가 토양으로 환원된다는 가정 하에 양분수지를 분석하는 경향이 있다. 예를 들면, 축사 환경 관리 또는 퇴비화 과정 중 퇴비화를 촉진시키기 위해 톱밥이나 왕겨와 같은 갈래물질이 인위적으로 투입되는데, 이들 갈래물질의 질소와 인 함량은 상이하기 때문에 전체 양분수지에 대한 영향이 상이할 것으로 예상된다. 또한, Michel et al.(2004)에 의하면 퇴비화 과정 중 질소는 최고 43% 손실될 수 있으며, Parkinon et al.(2004)는 인 또한 용탈에 의해 최고 28% 손실될 수 있다고 보고한 바 있다. 퇴비화 과정 중 양분 손실은 투입되는 갈래물질의 성질(C/N 비, 분해저항성)에 영향을 받는데, 일반적으로 C/N 비가 높고 리그닌 함량이 높은 톱밥에서의 양분손실률이 낮은 것으로 보고된다(Larney et al., 2006). 따라서 자연순환농업 시스템에서 보다 정확한 양분순환 구조 분석을 위해서는 이와 같은 갈래물질에 따른 퇴비화 과정 중 양분

변화를 고려할 필요가 있다. 본 연구는 단위 농가를 대상으로 갈래물질 투입에 의한 양분의 추가 유입 및 투입되는 갈래물질에 따른 축사내 분뇨 방치 및 퇴비화 과정 중 발생하는 양분 변동을 고려하여 자연순환농업 시스템의 양분순환구조를 분석함으로써 양분순환과정에서 갈래물질의 역할을 구명하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

연구 대상 농가 본 연구는 전라남도 영암군 도포면에 위치한 경종-한우 농가를 대상으로 2006년에 수행되었다. 대상 농가의 한우 사육두수는 100두이며 사료 생산을 위한 경지 면적은 2.5 ha였다.

단계별 양분 순환 분석 양분순환구조는 사료 → 분뇨 → 퇴비 → 토양 → 사료의 단계별로 질소와 인산에 대해서 조사하였다. 사료 급여량은 두당 1일 급여 사료 종류(조사료 및 농후사료) 및 양, 사료의 수분 및 양분 함량을 조사하여 농가에서 사육되고 있는 100두에 급여되는 사료 중 질소와 인산 함량을 연 단위로 계산하였다. 가축분뇨에 의한 양분 발생량은 농촌진흥청(2006)의 축종별 양분배설총량에 대한 “가축단위 기준안 보고” 자료를 이용하였다.

현재 농가에서 자가 퇴비를 생산할 때 가장 많이 이용되는 갈래물질은 톱밥과 왕겨이기 때문에 퇴비를 중심으로 한 양분순환구조는 톱밥과 왕겨 퇴비에 대해 각각 분석하였다. 이를 위해, 한우 30두를 수용할 수 있는 우사 2개소에 각 갈래물질 3톤(습윤 기준)을 투입한 후 우사 1개소 당 한우 30두를 사육하였다. 21일 후 분뇨와 갈래 혼합물질을 우사 밖으로 이동하여 비가림 조건에서 90일간 퇴비화 시켰다. 퇴비화 방법은 Kim et al.(2008)에 자세히 설명되어 있다. 간략하게 소개하면 전체 퇴비 더미의 규모는 톱밥퇴비가 1.6 m (높이) × 2.8 m (너비) × 4.2 m (길이), 왕겨퇴비가 각각 1.6 m × 2.7 m × 3.8 m 였다. 퇴비 더미는 20일 간격으로 교반하였고 교반시 마다 충분한 수분을 공급하였다. 퇴비화 전의 분뇨 혼합물과 퇴비화 후의 퇴비 습윤 중량을 측정하고 시료를 채취하여 건조하여 건물중을 계산하였으며, 건조 시료에 대해 질소와 인산 함량을 분석하였다.

완성 퇴비는 2006년 5월에 10 m × 10 m 면적의 시험 농경지에 질소 기준(110 kg N ha⁻¹)으로 사용하여 총체벼(남일벼, 재식밀도 30 × 14 cm)를 재배하였다. 벼 수확 후 동일 수준의 퇴비를 투입하여 총체보리(영양보리, 파종량 20 kg 10 a⁻¹)를 재배하였다. 수확된 총체벼와 총체보리에 대해 생체중과 질소 및 인산 흡수량을 조사하였다. 모든 양분순환구조는 해

당 농가의 한우 사육두수(100 두)와 경작지 면적(2.5 ha)를 기준으로 환산하여 분석하였다.

양분함량 분석 방법 깔개물질, 퇴비, 사료작물의 건물중은 시료를 65°C의 가열건조기에서 72시간 건조한 후 수분함량을 산출하여 조사하였다. 퇴비의 질소함량은 휘발성 질소의 손실을 방지하기 위해 동결건조기(FREEZE DRYER, Ilshin-lab, korea)로 건조하여 불밀(MM20, Retsch, Germany)로 곱게 분쇄한(<0.42 mm) 후 원소분석기(IsoPrime-EA, Micromass, UK)로 분석하였다(Bremner, 1996). 깔개물질과 사료작물은 가열건조기에서 건조하여 같은 방법으로 분쇄한 후 원소분석기로 분석하였다. 각 시료의 인산(P₂O₅)함량은 HNO₃-HClO₄로 산분해한 후 Ammonium paramolybdate-vanadate법으로 발색시켜서 분광광도계(Genesys 6, Thermo, USA)를 이용하여 470 nm에서 흡광도를 측정하여 계산하였다(Kuo, 1996).

결과 및 고찰

사료에 의한 양분 투입량 한우의 두당 1일 사료 급여량은 벧짚이 2.47 kg, 총체조사료 2.19 kg, 라이그라스 0.27 kg, 농후사료 5.99 kg이었으며, 이를 연간 100두 기준으로 환산하면 조사료와 농후사료 급여량은 각각 178.0톤과 218.7톤으로 계산되었다(Table 1). 이와 같은 급여량은 Kim(2004) 등이 홍성군을 대상으로 전체 한우 사육두수(27,921두)에 대한 조사료 및 농후사료 급여량 조사 결과를 이용하여 계산한 연간 100 두당 급여량인 136.4톤과 321.3톤과 유사하였다. 사료 급여량을 양분함량으로 환산하였을 경우 질소와 인산에 대해 각각 벧짚이 443 kg과 285 kg, 총체조사료가 474 kg과 281 kg, 라이그라스가 143 kg과 62 kg, 농후사료가 4,767 kg과 2,685 kg으로 조사되었으며, 양분의 연간 전체 투입량은 질소가 5,827 kg 인산이 3,313 kg이었다(Table 1).

분뇨와 깔개물질에 의한 양분 발생량 분뇨 원단위 발생량은 과거부터 지속적으로 조사되고 있기 때문에 가급적 최신의 원단위 자료를 활용하는 것이 타당하다. 2008년 10월 현재 축산과학원에 문의한 결과 최신의 원단위 조사는 현재 진행 중이기 때문에 연구대상 농가에서 1년 동안 한우 100두를 사육하는 과정에서 발생하는 양분의 총량은 농촌진흥청(2006)의 축종별 양분배설총량에 대한 “가축단위 기준안 보고” 자료를 이용하여 계산하였다. 분뇨 원단위는 축종은 물론 생육단계와 급여 사료의 종류에 따라 달라지기 때문에 본 연구에서 제시한 양분 발생량은 실제 발생량과 차이를 보일 수 있다. 하지만, 본 연구의 목적은 단순한 양분수지 분석이 아니고 톱밥과 왕겨를 깔개물질로 사용했을 때 깔개물질의 종류에 따른 양분순환구조 변동이기 때문에 양분 발생량이 상호 동일할 경우 결과 해석에 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

농촌진흥청(2006)의 축종별 양분배설총량에 대한 “가축단위 기준안 보고” 자료에 의하면 한우의 질소 원단위 발생량은 112 g head⁻¹ day⁻¹이며, 인산 원단위 발생은 32 g head⁻¹ day⁻¹이다. 이를 이용하여 농가의 한우 사육두수인 100두에 대한 연간(365일) 질소와 인산 발생량을 계산한 결과 각각 4,088 kg과 1,168 kg이었다(Table 2). Kim(2004)이 홍성군을 대상으로 수행한 연구 결과를 100 두로 환산하면 질소와 인산 발생량은 각각 약 1,991 kg과 931.2 kg이었는데, 본 연구 결과와 비교하면 인산 발생량은 유사했지만 질소 발생량은 2배 이상 높았다. 이는 본 연구가 농림부(MAF, 2000)에서 제시한 양분 원단위 발생량 이용하는 대신 보다 최근에 제시된 원단위 발생량을 이용한 결과로 판단된다.

Kim et al.(2001)이 국내에서 발생하는 양분함량을 조사하여 양분순환모델을 제시한 결과에 의하면, 전국의 재배작물 시비기준을 고려하여 필요한 질소와 인산의 총요구량이 279,884톤, 140,464톤일 때 가축분뇨로부터 발생하는 비료성분량이 질소 222,331톤, 인

Table 1. Yearly amounts of nutrients inputs by fodder feeding in the study farm.

Feed [†]	Feeding amount		Nutrient content		Annual nutrient inputs via feed	
	Daily	Annual	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
	kg head ⁻¹	ton 100 heads ⁻¹	----- % -----		----- kg 100 heads ⁻¹ -----	
RS	2.47	90.2	0.49	0.32	443	285
WCR	2.19	79.9	0.59	0.35	474	281
RG	0.27	9.9	1.45	0.63	143	62
CF	5.99	218.7	2.18	1.23	4,767	2,685
Total	10.9	398.7	NA	NA	5,827	3,313

NA, Not applicable.

All the values were reported in wet weight basis.

[†] RS, Rice straw; WCR, Whole crop roughage; RG, Ryegrass; CF, concentrated feed.

Table 2. Annual production of nutrients by excretion in the study farm.

Nutrients	Daily production from unit cattle [†]	Annual production at the study farm
	g head ⁻¹ day ⁻¹	kg 100 heads ⁻¹ year ⁻¹
N	112	4,088
P ₂ O ₅	32	1,168

[†] Source: Rural Development Administration (2006).

산 64,716톤으로 작물의 비료성분 요구량과 비교하면 질소의 경우 요구량의 86.7%, 인산은 53.6%를 가축분뇨퇴비로 대체할 수 있다고 하였다. 본 연구 대상 농가의 경지면적(2.5 ha)에서 벼를 재배할 경우 (시비량 110 kg N ha⁻¹, 45 kg P₂O₅ ha⁻¹) 필요 질소와 인산량은 각각 275 kg과 112.5 kg으로 계산되며, 벼와 보리 2모작일 경우에는 약 550 kg과 225 kg이 요구된다. 따라서, 본 농가에서 발생하는 분뇨에 의한 질소와 인산의 발생량은 각각 필요량의 7.4배와 5.2배로 나타났기 때문에 외부로의 분뇨 또는 퇴비 반출이 필요할 것으로 판단된다.

지금까지의 자연순환농업 시스템내 양분순환 분석 연구에서 톱밥과 왕겨와 같은 깔개물질의 기여도를 조사한 경우는 매우 드물다. 본 연구에서 깔개물질인 톱밥과 왕겨의 100두 기준 연간 투입량은 톱밥이 173.8톤 이며, 왕겨는 173.8톤 이었다(Table 3). 또한 이를 양분으로 환산하였을 경우 톱밥에 의한 질소와 인산 투입량은 각각 66 kg과 36 kg 이었으며, 왕겨는 각각 584 kg과 320 kg 으로 조사되었다(Table 3). 이를 분뇨에 의한 양분 발생량과 비교하면 톱밥의 경우 질소는 1.6%, 인산은 3.1%, 왕겨의 경우는 각각 14.2%와 27.4%에 해당한다. 따라서, 깔개물질로 왕겨를 사용하는 자연순환농업시스템의 양분순환구조 분석을 위해서는 왕겨에 의한 질소와 인산 공급량을 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.

퇴비화 과정 중 양분 변동 및 완성 퇴비 중 양분 함량 가축분뇨 발생시점(깔개물질 투입에 의한 양분 공급과 21일간 사육기간동안 배설된 분뇨에 의한 양분 발생)에서의 질소와 인산의 함량은 톱밥 깔개물

질의 경우 각각 4,154 kg과 1,204 kg이었고, 왕겨의 경우는 각각 4,672 kg과 1,488 kg으로 왕겨를 깔개물질로 사용했을 때 양분 발생량이 많았는데(Table 4), 이는 톱밥보다 왕겨의 질소와 인산함량이 높기 때문이다(Table 3). 분뇨와 깔개물질 혼합물의 퇴비화를 위해 야적한 시점의 건물중은 톱밥 퇴비가 140톤, 왕겨퇴비가 103톤으로 왕겨 투입 축사에서 유기물 분해가 더 빠르게 일어났다. 또한, 퇴비화를 위한 야적시점에서의 질소와 인산 함량은 톱밥퇴비에서 각각 1,332 kg과 1,142 kg이었고, 왕겨퇴비에서 각각 991 kg과 1,403 kg이었다. 이를 초기 질소와 인산함량과 비교하면 톱밥퇴비의 경우 초기 질소와 인산의 67.9%와 5.1%가 손실되었으며, 왕겨퇴비에서의 손실률은 각각 78.8%와 5.7%로 왕겨퇴비에서의 양분 손실률이 많았다. 이는 우사 내에서 최장 21일간 분뇨와 깔개물질을 방치하는 기간 동안의 손실에 의한 결과로 판단된다(Larney and Hao, 2007).

퇴비화 90일 후 퇴비에 함유된 질소의 함량은 톱밥과 왕겨퇴비에서 가축분뇨 발생시점 기준으로 질소는 각각 78.4%와 81.6%가 손실된 것으로 나타났다. 반면, 인산의 경우 톱밥퇴비와 왕겨퇴비에서의 손실률이 각각 9.5%와 10.3%로 질소에 비해 손실률이 낮았다. 그 결과 최종적으로 농가에서 이용할 수 있는 퇴비의 건물중은 톱밥퇴비의 경우 86톤, 왕겨퇴비는 70톤이었으며 각각의 질소 및 인산 함량은 톱밥퇴비의 경우 895 kg과 1,089 kg이었고, 왕겨퇴비는 859 kg과 1,335 kg이었다(Table 4). 이와 같이 퇴비화 과정 중 질소 손실은 기존의 연구와 일치하는데, Michel et al.(2004)은 젖소분뇨의 퇴비화과정 중 톱밥퇴비의 경우 8~26%, 밀짚퇴비의 경우 15~43%의 질소 손실이 일어났다고 보고하였다. 분뇨 야적 및 퇴비화 과정 중 질소손실은 대부분 암모니아 휘산에 의한 결과로 보고된다(Larney et al., 2006). 한편, Larney et al.(2006)은 인산의 경우 퇴비 더미 중 이동성이 낮아 질소에 비해 손실률이 낮다고 보고하였다. 이와 같이 가축분뇨 발생 시점부터 완성퇴비까지의 시간 동안 상당한 질소 손실이 발생했으며, 질소 손실량은 깔개물질에 따라 차이가 있었다. 따라서, 향후 농업분야에서 양분순환 또는 양분수지 분석을 위

Table 3. Annual inputs of nutrients by bedding material additions in the study farm.

Bedding material	Annual addition ton 100 heads ⁻¹	Nutrient content		Annual input of nutrients	
		N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
		----- % -----		----- kg 100 heads ⁻¹ -----	
Sawdust	173.8	0.038	0.021	66	36
Rice hull	173.8	0.336	0.184	584	320

All the values were reported in wet weight basis.

해서는 이와 같은 질소 손실을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 왕겨퇴비보다 톱밥퇴비에서의 물질과 양분 손실률이 더 큰 것으로 조사되었는데, 이와 같은 깔개 물질에 의한 차이는 깔개 물질의 C/N비와 유기물의 분해 저항성과 관련된다(Michel et al., 2004). 본 연구와 병행해서 진행된 Kim et al.(2008)의 조사에 의하면 톱밥과 왕겨의 C/N비는 각각 1,268과 102로 톱밥의 C/N비가 10배 이상 높고 톱밥은 난분해성인 리그닌 함량이 높아서 톱밥퇴비의 퇴비화 속도가 왕겨퇴비에 비해 상대적으로 느리게 진행된다고 하였다. 왕겨 퇴비와 같이 유기물의 분해가 빠른 속도로 진행될 경우 가급적 질소와 인산의 농도가 증가하여 양분 손실률이 상대적으로 증가할 수 있는 것으로 판단된다.

총체사료 작물의 양분흡수량 완성퇴비의 농경지(2.5 ha) 시용(질소 110 kg N ha⁻¹ 기준 시용, 총체벼와 보리 2작)에 의해 질소 550 kg이 투입되었으며 인산은 톱밥퇴비 투입에 의해 669 kg, 왕겨퇴비 처리에 의해 561 kg이 토양에 투입되었다. 전반적으로 총체벼의 생체중이 총체보리 보다 높았으며, 그 결과 질소와 인산의 흡수량도 총체벼가 많았다(Table 5).

왕겨퇴비 처리구의 질소 흡수량은 916.2 kg으로 톱밥퇴비 처리구의 764.2 kg 보다 높았는데(Table 5), 이는 톱밥퇴비보다 왕겨퇴비에 함유된 양분의 유효도가 더 높음을 의미한다(Larney et al., 2008). 톱밥과 왕겨퇴비 처리구에서 투입된 질소보다 각각 약 214 kg과 366 kg 더 많은 양의 질소가 작물에 의해 흡수

되었는데, 이는 퇴비에 의해 투입된 질소의 이용도가 매우 낮음을 의미한다(Choi et al., 2002). 예를 들면 Choi et al.(2001)은 비료 흡수력이 큰 옥수수를 대상으로 한 실험에서 퇴비 중 무기태 질소가 모두 흡수된다는 가정 하에 퇴비의 질소 흡수율이 50% 내외로 보고한 바 있다. 토양에서 질소의 동역학은 매우 다양한데, 강우에 의해서 질소가 유입될 수도 있으며, 암모니아 휘산, 질산염 용탈 및 탈질에 의한 손실도 발생한다(Choi et al., 2007). 예를 들면, Kwak et al.(2008)는 우리나라 서해안 지역에서 강우에 의한 연간 NH₄⁺과 NO₃⁻의 유입량을 각각 6.4 kg ha⁻¹과 10.2 kg ha⁻¹로 추정된 바 있다. 따라서, 투입된 퇴비에 의한 질소 공급량 보다 많은 질소가 작물에 의해 흡수된 것은 토양 고유의 질소와 강우에 의해 유입된 질소의 흡수에 의한 것으로 판단된다.

인산의 경우 톱밥과 왕겨퇴비 처리구의 작물 흡수량이 각각 263.6 kg과 294.2 kg 이었는데, 이는 시용된 퇴비 중 인산함량인 669 kg과 855 kg보다 약 3배 정도 적은 양이다(Table 5). 인산의 낮은 이동성을 고려하면 흡수되지 않은 인산은 토양에 잔류할 가능성이 매우 높다. 따라서 현재와 같은 퇴비 이용 조건에서는 토양 중 인산 축적량이 지속적으로 증가하여 작물 양분 불균형 및 환경오염 등의 문제가 우려되며 이를 해결하기 위해서는 퇴비화 과정 중 발생하는 질소 손실을 경감하여 퇴비 중 질소 함량을 적정 수준으로 유지함으로써 토양에 투입되는 인산 함량을 감소시킬 수 있는 방법 개발이 필요하다. 또한, 퇴비를 작물의 인산 요구량 기준으로 시용하고 부족한 질소는 타 질소원의 공급으로 균형을 맞추는 방안도 모색

Table 4. Changes in nutrients during storage in the feedlot and composting process.

Compost type	In the cattle shed [†]		At the initiation of composting			In the final compost		
	N	P ₂ O ₅	DM	N	P ₂ O ₅	DM	N	P ₂ O ₅
	----- kg -----		ton	----- kg -----		ton	----- kg -----	
Sawdust	4,154	1,204	140	1,332 (67.9)	1,142 (5.1)	86	895 (78.4)	1,089 (9.5)
Rice hull	4,672	1,488	103	991 (78.8)	1,403 (5.7)	70	859 (81.6)	1,335 (10.3)

[†] Nutrients produced during livestock feeding plus added via bedding material.

[‡] Values in the parentheses are % of loss relative to the initial amount in the cattle shed.

Table 5. Plant growth and uptake of nutrients.

Compost type	Fresh weight			N uptake			P ₂ O ₅ uptake		
	Rice	Barley	Sum	Rice	Barley	Sum	Rice	Barley	Sum
	----- ton 2.5 ha ⁻¹ -----			----- kg 2.5 ha ⁻¹ -----			----- kg 2.5 ha ⁻¹ -----		
Sawdust	89.5	42.1	131.6	547.7	216.5	764.2	199.6	64.0	263.6
Rice hull	94.5	48.4	142.9	632.2	284.0	916.2	218.3	75.9	294.2

할 필요가 있다(Eghball and Power, 1999; Eghball, 2002).

양분순환구조 그 동안 지역내의 자연순환농업에 대한 연구가 다수 수행 되어왔으며 다양한 양분순환 모델이 개발되었다(Kim and Kang, 2002; Kim and Kim, 2003). 하지만 본 연구에서 제시한 바와 같이 퇴비화 과정에서 수반되는 다양한 양분 수지변화를 반영하지 못한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 대상 농가의 사료 가축 → 분뇨 → 퇴비 → 토양 → 사료로 연결되는 연간 양분순환구조를 톱밥퇴비(Fig. 1)와 왕겨퇴비(Fig. 2)로 구분하여 조사하였다. 퇴비 종류 별 큰 차이가 없이 분뇨(양분) 발생량과 경지면적의 불균형에 의해 일부 퇴비는 외부로 반출되었는데 톱밥퇴비의 경우 전체 발생 양분(질소 4,154 kg, 인산 1,204 kg) 중 질소 8.3%와 인산 34.9%가 외부로 반출되었다. 왕겨퇴비의 경우는 그 비율이 각각 6.6%와 32.3%였다. 하지만, 우사내 야적 기간 및 퇴비화 과정 중 손실된 질소의 비율은 톱밥퇴비에서 78.4%, 왕겨퇴비에서 81.6%로 인위적인 외부 반출량보다 많았다. 반면, 인산의 경우 야적 및 퇴비화 기간 중 손실된 비율이 각각 9.5%와 10.3%로서 외부 반출 비율보다 낮았다.

이상의 양분순환구조 분석 결과를 이용하여 최종 완성퇴비 중 질소함량, 총체사료의 질소시비량, 보유 경지면적을 근거로 대상 농가의 적정 사육두수와 경지면적을 제안할 수 있었다. 현재의 경지면적이 수용 가능한 한우 사육두수는 톱밥퇴비의 경우 61두, 왕겨퇴비의 경우 64두이며, 현 사육두수를 유지하기 위해 필요한 추가 경지 면적은 톱밥퇴비의 경우 1.6 ha, 왕

겨퇴비의 경우 1.4 ha였다. 이와 유사한 방식으로 지역내의 양분순환구조를 이용하여 적정 사육두수를 제안한 일부 연구가 보고된 바 있다. 예를 들면 Yoon(2005)은 충청남도 아산시의 지역내 조사료 총생산량을 기준으로 두당 1일 사료 급여량이 5 kg(농후 사료 3 kg + 조사료 2 kg)일때 사육가능 두수를 1,347두로 제안한 바 있다. 또한, Kim(2006)은 2002년 홍성군을 모델로 농경지 질소투입량을 이용하여 적정 사육두수를 제안하였는데, 지역 농경지의 전체 질소 요구량이 3,136 톤일 경우 젓소 37,557두(연간 두당 질소 83.5 kg 배출 가정)를 수용할 수 있다고 하였다. 하지만, 이와 같은 연구는 깔개물질에 의한 양분 투입량 증가, 퇴비화 과정 중 양분 손실 등 양분순환과정에서 발생하는 양분 변동을 고려하지 않고 분뇨에 의한 양분 발생량을 우선적으로 고려한 면에서 본 연구와 차이가 있다.

적 요

본 연구에서는 깔개물질에 의한 양분 유입 및 축사내 분뇨 방치 및 퇴비화 과정 중 발생하는 양분손실이 양분순환에 미치는 영향을 조사하기 위해 전남 지역 한우 농가(사육두수 100두, 경지 면적 2.5 ha)를 대상으로 사료 → 가축 → 분뇨 → 퇴비 → 토양 → 사료의 양분순환구조를 분석하였다. 분뇨에 의해 발생한 질소와 인산을 기준으로 비교했을 때, 톱밥을 깔개물질로 사용할 경우 질소 1.6%, 인산 3.1%, 왕겨의 경우 질소의 14.2%와 인산 27.4%가 추가로 공급되는 것으로 나타났다. 따라서, 양분수지 또는 양분순환구조 분석에서 깔개물질의 종류와 사용량도 고려할 필요가 있다. 양분순환구조의 가장 큰

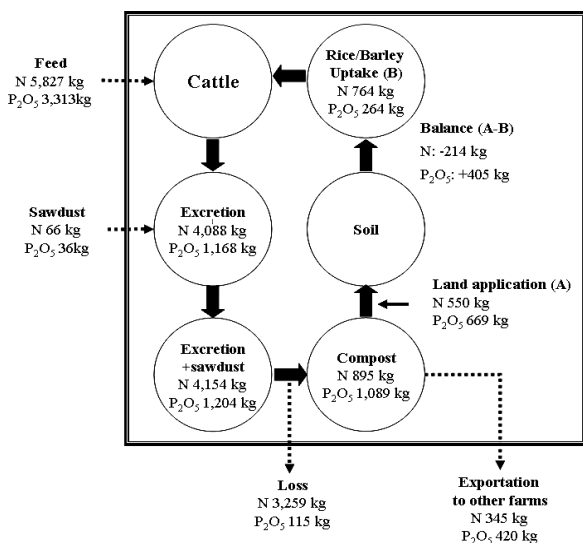


Fig. 1. Sawdust-compost based nutrient cycling structure in the study farm.

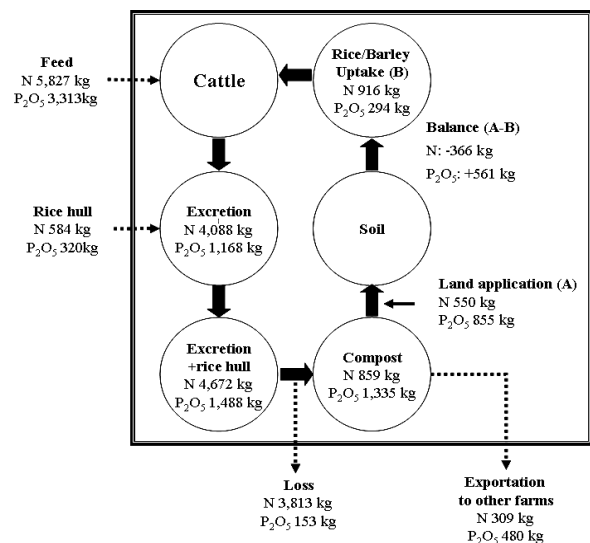


Fig. 2. Rice hull-compost based nutrient cycling structure in the study farm.

특징은 우사내 분뇨의 야적기간(21일)과 퇴비화 기간(90일) 동안에 발생하는 물질과 양분의 손실이였다. 톱밥퇴비의 경우 이 기간 동안 질소의 78.4%, 인산의 9.5%가 손실되었으며, 왕겨퇴비의 경우 각각의 손실률은 81.6%와 10.3%였다. 톱밥 퇴비의 물질 및 양분 손실률이 낮은 것은 톱밥의 C/N 비와 난분해성인 리그닌 함량이 높아서 유기물 분해가 상대적으로 느리게 일어났기 때문으로 판단되었다. 기존의 양분수지 연구는 대부분 분뇨 발생 시점의 양분함량을 기준으로 계산하였지만, 본 연구의 결과에 의하면 분뇨 발생 이후부터 농경지 시용 이전까지 발생하는 양분손실과 이에 영향을 미치는 깔개 물질의 특성을 고려하여야만 정확한 양분수지 구명이 가능한 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어졌으며, 전남대학교 농업과학기술연구소의 시료 분석 지원에 감사드립니다. 또한, 논문에 대한 많은 수정 보완 사항을 지적해 주신 편집위원님들께도 감사드립니다.

인 용 문 헌

- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total. p. 1085-1122. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI. USA.
- Choi, W.J., G.H. Han, S.M. Lee, G.T. Lee, K.S. Yoon, S.M. Choi, and H.M. Ro. 2007. Impact of land-use types on nitrate concentration and $\delta^{15}\text{N}$ in unconfined groundwater in rural areas of Korea. *Agr. Ecosyst. Environ.* 120:259-268.
- Choi, W.J., S.A. Jin, S.M. Lee, H.M. Ro, and S.H. Yoo. 2001. Corn uptake and microbial immobilization of ^{15}N -labelled urea-N in soil as affected by composted pig manure. *Plant Soil* 235:1-9.
- Choi, W.J., S.M. Lee, H.M. Ro, K.C. Kim, and S.H. Yoo. 2002. Natural ^{15}N abundances of maize and soil amended with urea and composted pig manure. *Plant Soil* 245:223-232.
- Eghball, B. 2002. Soil properties as influenced by phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications. *Agron. J.* 94:128-135.
- Eghball, B., and J.F. Power. 1999. Phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications: corn production and soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 895-901.
- Gao, C, B. Sun, and T.L. Zhang. 2006. Sustainable nutrient management in Chinese agriculture: challenges and perspective. *Pedosphere* 16, 253-263.
- Hur, D., and M.H. Park. 2006. An analysis on the success factors of environmental-friendly agriculture in Yangpyeong-gun, Korea. *Korean J. Agr. Manage. Policy* 33:20-36.
- Kim, C.K. 2003. Regional-based nutrients cycling and development strategy of environmental-friendly agriculture. Symposium on the development model and policy for environmental-friendly agriculture. Korean Society of Organic Agriculture.
- Kim, C.K. 2004. The status and prospect of environmental-friendly agriculture: A case study on Hongsung-gun. Korea Rural Economic Institute, Seoul. Korea.
- Kim, C.K., and C.Y. Kang. 2002. A Study on the Systematization of Regional-Based Agri-Environmental Model. Korea Rural Economic Institute, Seoul. Korea.
- Kim, C.K., and T.Y. Kim, 2003. Analysis of regional-based mass balance for systematization of environmental-friendly agriculture. *Korean Rural Econ. Rev.* 26: 1-24.
- Kim, J.E. 2006. A Study Based on Reasonable Level Estimation of Livestock Industry Considering Environmental Capacity. M.S. Thesis, Kongju University, Kongju, Korea.
- Kim, J.H., C.H. Park, J.D. Han, and B.G. Park. 2001. Determining the optimum number of livestock considering regional pollution load. *Korean J Agr. Manage. Policy* 28:255-277.
- Kim, Y.J., W.J. Choi, S.S. Lim, J.H. Kwak, S.X. Chang, H.Y. Kim, K.S. Yoon, and H.M. Ro. 2008. Changes in nitrogen isotopic compositions during composting of cattle feedlot manure: effects of bedding material type. *Bioresour. Technol.* 99:5452-5458.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. p. 869-920. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI. USA.
- Kwak, J.H. W.J. Choi, S.S. Lim, S.H. Lee, S.M. Lee, S.X. Chang, J.W. Jung, K.S. Yoon, S.M. Choi. 2008. Sources and transformations of N in reclaimed coastal tidelands: evidence from soil ^{15}N data. *Environ. Geol.* 53:1331-1338.
- Larney, F.J., A.F. Olson, J.J., Miller, P.R. DeMaere, F. Zvomuya, and T.A. McAllister. 2008. Physical and chemical changes during composting of wood chip-bedded and straw-bedded beef cattle feedlot manure. *J. Environ. Qual.* 37:725-735.
- Larney, F.J., D.M. Sulliva, K.E. Buckley, and B. Eghball. 2006. The role of composting in recycling manure nutrients. *Can. J. Soil Sci.* 86:597-611.
- Larney, F.J., and X. Hao. 2007. A review of composting as a management alternative for beef cattle feedlot manure in southern Alberta, Canada. *Bioresour. Technol.* 98: 3221-3227.
- Michel, F. C., J.A. Pecchia, J. Rigot, and H.M. Keener. 2004. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci. Util.* 12:323-334.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF). 2000. Recycling and Utilization of Livestock Manure. Research Report of National Institute of Animal Science, RDA, Suwon, Korea.
- Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF). 2008. Statistics on Food, Agriculture, Forestry and Fisheries. Kwacheon, Korea.
- Parkinson, R., P. Gibbs, S. Burchett, and T. Misselbrook. 2004. Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of

- cattle manure. *Bioresour. Technol.* 91:171-178.
- Sim, J.C. 2005. A study on the development of regional livestock industry based on sustainable agriculture in Korea. *Korean J. Organic Agr.* 13:339-355.
- Yoon, J.Y. 2005. A Study on the Model and Strategy for Developing Environmentally Friendly Agriculture of Asan Area. M.S. Thesis, Dankuk University, Cheonan, Korea.