



지역특성을 고려한 경축순환농업 모형의 가축분뇨 양분 흐름분석

이준희, 최홍림[†]

서울대학교 농생명공학부

(2015년 6월 10일 접수, 2015년 6월 18일 수정, 2015년 6월 22일 채택)

Livestock Manure Nutrients Flow Analysis of Integrated Crop-Livestock Farming Model Reflecting the Regional Characteristics

Joon Hee Lee, Hong Lim Choi[†]

Department of Agricultural Biotechnology, Seoul National University

ABSTRACT

Integration of crop-livestock farming has been a problem-solving mode for abatement of environmental pollution and recovery of resources in recent years. The objectives of this study were 1) to suggest the customized integration of crop-livestock farming model reflecting the regional characteristics through in-depth analysis of case study and 2) to analyze the livestock nutrients flow in terms of three primary elements as nitrogen(N), phosphorous(P), and potassium(K). The personal interview and survey were carried out in 2012 for a total of 161 farms from four different regions(NS, NW, JJ, YC) in South Korea. The mass balance analysis was used to suggest and evaluate the models for two sites(JJ and YC). The results showed that NS and NW sites produced relatively more livestock manure than the sites of YC and JJ because of the regional differences in livestock numbers and urbanization. The models were suggested for the site JJ and site YC, and 'two track model(energy and resource recovery)' and 'dispersal type model' were assigned respectively. For the nutrient flows, the releasing P and K with new models had increased up to 7%, while N release had decreased down to 15% in both YC and JJ sites compared to the present treatment system. Estimated value showed that there was oversupply of N (719 ton/yr) and P₂O₅ (1,269 ton/yr) in YC and deficiency of N (671 ton/yr) and excessive P₂O₅ (32 ton/yr) in JJ respectively. Therefore, P runoff has to be considered an eutrophication occurs in rural small stream when an integration of crop-livestock farm system is applied into both sites.

[†]Corresponding author(ulsoo8@snu.ac.kr)

Keywords : Integrated Crop-Livestock Farming, Nutrient Mass Balance, Compost, Liquid fertilizer

초 록

경축순환농업은 축산농가에서 발생하는 가축분뇨를 비료자원으로 인식하여 농경지로 환원하는 지속 가능한 농업체제로 부상하였다. 하지만 우리나라의 경축순환농업 체계는 아직 미비하여 가축분뇨 처리 및 자원화에 애로를 겪고 있는 지역을 쉽게 찾아볼 수 있다. 본 연구에서는 1) 지역 특성을 고려한 맞춤형 경축순환농업 모델을 제시하고 2) 가축분뇨의 농경지 환원 시 잠재적 양분 공급량 및 작물의 양분 요구량에 관한 관계분석을 바탕으로 제시된 모형의 바이오매스 물질흐름 분석을 그 목적으로 한다. 개별농가 시설을 통한 경축순환농업을 실행하고 있는 우리나라 지역 두 곳과 (YC, JJ)과 공동자원화시설을 위탁처리하고 있는 두 곳 (NW, NS)을 선정하여 NS의 두 지역, NW의 세 지역, YC의 세 지역, JJ의 네 지역 등 총 열두 곳의 지역별 현장조사 및 면접을 실시하였고, 설문조사를 위한 농가들은 NW의 54농가, YC의 51농가, JJ의 44농가로 총 149농가의 설문조사를 수행하였다. JJ지역의 공동자원화시설은 퇴액비화 역할뿐만 아니라 에너지화 모델로의 공동추진(two track model)이 보다 효과적일 것으로 판단된다. YC지역의 경우, 중규모(30톤 내외)의 분산형 공동자원화시설 3~4개를 축산농가가 밀집된 면(面)에 설치하는 모형이 적합할 것으로 판단된다. 기존 처리현황 대비 공동자원화시설이 적용된 시나리오의 양분흐름을 비교해 보면 두 지역 모두 인과 칼리량은 늘어나고(최대 7%까지) 질소량은 감소하는(최대 15%까지) 경향을 보이는 것으로 나타났다. 모형이 적용된 YC지역의 가축분뇨 유래 질소, 인산, 칼리는 전반적으로 비슷하게 고른 값을 보이고 있으나, 작물의 양분요구량과 양분의 토양 환원량을 비교해 보면 연간 질소가 719톤, 인이 1,269톤씩 각각 과잉 공급되고 있음을 알 수 있다. JJ지역의 경우 작물 양분요구량 대비 질소 671톤/년의 추가공급이 필요할 것으로 추정되며 이는 화학비료로 대체될 수 있음을 의미한다. 인의 경우 32톤이 과잉공급되어 JJ와 YC 지역 모두 인의 지표수 유출(runoff)에 기인한 부영양화(eutrophication)를 고려하여 경축순환농업 모형을 구축해야 할 것으로 판단된다.

주제어 : 경축순환농업, 양분수지, 가축분뇨 퇴비, 가축분뇨 액비

1. 서론

축산농가에서 발생하는 가축분뇨를 비료자원으로 활용하여 농경지로 환원하는 자원순환체계, 즉 경축순환농업은 지속 가능한 농업관점에서 필수불가결한 화두로 부상하였다¹⁾. 농장단위부터 지역단위까지의 다양한 경축순환농업 체계는 관행 축산에서 기인한 환경오염²⁾, 생물다양성 손실³⁾, 양분불균형³⁾ 등의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 제시되고 있다. 우리나라의 경축순환농업 체계는 아직 미비하여 가축분뇨 처리 및 자원화에 애로를 겪고 있는 지역을 쉽게 찾아볼 수

있다. 국내 경축순환농업 현황 및 수준을 파악하고 상대적으로 부진한 지역의 경축순환농업 체계를 면밀히 검토하여 지역 특성에 맞는 과학적인 발전방안 및 모형(안)을 모색할 필요가 있다. 실행되고 있는 국내 가축분뇨 처리방법에는 지역별 차이가 존재하지만 일반적으로 공동자원화시설, 개별농가 퇴·액비시설, 공공처리시설, 개별농가 정화처리시설의 크게 네 가지 체계로 구성되어 운영되고 있다. 공동자원화시설과 개별농가 퇴·액비시설로 수거, 반입된 가축분뇨는 고액분리 후 자원화 공정을 통해 액비와 퇴비로 변환된다. 이후 액비와 퇴비는 화학비료와 함께 각 지역의

농경지에 살포된다. 반면 공공처리시설과 개별농가 정화처리시설을 통한 가축분뇨는 정화공정을 거쳐 하천으로 방류된다. 현장조사를 통한 데이터와 조사한 현장의 처리시설 현황을 바탕으로 지역단위 축산농가에서 발생하는 가축분뇨 유래 퇴·액비의 정량화를 비롯하여 해당 비료성분이 농경지 환원에 이르기까지의 양분 유입, 유출, 작물흡수 과정을 통해 액비와 퇴비 그리고 화학비료의 비료성분(N, P, K) 흐름을 추적하는 것은 화학비료의 환경적, 경제적 효율성과 퇴·액비의 농경지 환원을 통한 비료 성분의 재활용이라는 측면에서 볼 때 중요한 사안이다. 따라서 본 연구에서는 1) 지역특성을 고려한 맞춤형 경축순환농업 모델을 제시하고 2) 가축분뇨의 농경지 환원 시 잠재적 양분공급량 및 작물의 양분 요구량에 관한 관계분석을 바탕으로 제시된 모델의 양분흐름 분석을 그 목적으로 한다.

2. 연구 방법

개별농가 시설을 통한 경축순환농업을 실행하

고 있는 우리나라 지역 두 곳과 (YC, JJ)과 공동자원화시설을 위탁처리 하고 있는 두 곳 (NW, NS)을 선정하고 두 권역(圈域)의 현황을 비교·분석하여 경축순환농업 활성화의 기반을 마련하고자 하였다. 설문조사를 통한 사례지역의 경축순환농업에 대한 축산 및 경종농가의 인식 등 경축순환농업과 관련된 인문사회 및 경제 분야를 조사·분석하기 위하여 축산농가와 경종농가를 대상으로 면접조사를 실시하였다. 조사 대상자들의 이해를 돕기 위하여 면접원이 우선 설문지의 취지에 대한 충분한 설명을 하고 순서에 따라 개별적으로 문답하는 방식으로 조사를 수행하였고, 면접원들이 조사대상자를 접촉하고 동의를 얻어 면대면(face-to-face) 조사 방식으로 진행되었다. 설문조사의 일관성을 위해 이 조사에 참여하는 면접원들을 대상으로 조사의 취지와 목적, 조사 진행 방식 등에 대한 사전 교육을 실시하였다. [Table 1]은 면접 및 설문조사를 실시한 사례지역을 나타낸 것으로 2012년 6월~9월이 현장조사 및 설문조사 기간으로 선정되었다. NS의 두 지역, NW의 세 지역, YC의 세 지역, JJ의 네

[Table 1] Date of Interview and Survey Investigation in sampling sites

Site	Farm Location	Type of research	Date
NS	NS ○○myeon △△KFLC	Interview	2012.07.03.
	NS □□myeon ○○KFLC	Interview	2012.07.03.
NW	NW △△myeon □□ri San 103	Interview	2012.06.26.
	NW ○○eup △△bio	Interview	2012.06.26.
	NW ○○myeon □□ri 1065-4	Interview	2012.07.11.
	54 farms in NW state (21 livestock farms and 33 crop farms)	Survey	2012.08.13.~2012.08.15.
YC	YC □□myeon △△ri 315	Interview	2012.07.10.
	YC ○○eup △△ri 600	Interview	2012.07.10.
	YC △△eup □□ri 644	Interview	2012.07.10.
	51 farms in YC (30 livestock farms and 21 crop farms)	Survey	2012.10.26.~2012.10.27.
JJ	JJ □□myeon △△ri 133	Interview	2012.07.17.
	JJ △△myeon □□ri 275-1	Interview	2012.07.17.
	JJ ○○myeon □□ri 61-5	Interview	2012.07.17.
	JJ △△myeon □□ri 302-1	Interview	2012.07.17.
	44 farms in JJ state (19 livestock farms and 25 crop farms)	Survey	2012.09.20.~2012.09.22

지역 등 총 열두 곳의 지역별 현장조사 및 면접을 실시하였고, 설문조사를 위한 농가들은 NW의 54농가, YC의 51농가, JJ의 44농가로 총 149농가의 설문조사를 수행하였다.

2.1 가축분뇨 발생량

각 지역에서 발생하는 가축분뇨는 자원화시설을 거쳐 액비(Liquid fertilizer; LF)와 퇴비(Solid fertilizer; SF)로 분리 및 가공되고 이 후 작물에 살포된다. 작물 중에서 사료로 사용되는 사료작물은 가축의 먹이로서 활용되어 사료작물이 흡수한 양분은 다시 가축에게 돌아가게 된다. 이러한 가축분뇨 자원화시설을 기반으로 비료성분의 수지에 영향을 미칠 수 있는 추정 가능한 변수들을 사용한 표현식은 다음과 같다. 양돈농가에서 발생하는 분뇨의 양은 각 농가의 사육두수와 연평균 분뇨 발생량으로부터 구할 수 있다. 가축분뇨 발생량은 분뇨발생 원단위(환경부 고시 제1999-109호, 1999.7.8.)를 바탕으로 '08년도에 재산정된 결과를 적용하였다. 이를 식으로 나타내면 식(1)과 같다. 총 분뇨발생량(T)은 i 지역의 가축사육두수(f_{ai})와 발생 원단위(mp)를 곱하여 산정하였다.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{a_1}f_{b_1}f_{c_1}f_{d_1} \\ f_{a_2}f_{b_2}f_{c_2}f_{d_2} \\ \vdots \\ f_{a_n}f_{b_n}f_{c_n}f_{d_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} mp_a \\ mp_b + sd_b \\ mp_c + sd_c \\ mp_d \end{pmatrix} \quad (1)$$

- f_{a_i} : number of pig
- f_{b_i} : number of cow
- f_{c_i} : number of dairy cow
- f_{d_i} : number of poultry
- mp_a : the amounts of pig manure production (ton/yr/head)
- mp_b : the amounts of cow manure production (ton/yr/head)
- mp_c : the amounts of dairy cow manure production(ton/yr/head)

- sd_b : the amounts of cow manure + saw dust (ton/yr/head)
- sd_c : the amounts of dairy cow manure + saw dust (ton/yr/head)
- mp_d : the amounts of poultry manure production (ton/yr/head)

위의 행렬에서 모든 T_i 들을 더하면 ($T_{man} = \sum_i^n T_i$) 자원화 처리시설로 반입되는 또는 농가에서 처리되는 가축분뇨 총량이 된다.

2.2 축산유래 가축분뇨 자원화 실태 조사

사레지역별 가축분뇨처리 현황은 다음과 같다. NS지역의 개별농가 퇴비화는 전체 가축분뇨처리 대비 46%, 개별농가 액비화는 5%, 개별농가 정화처리는 4%, 공공처리장은 10%, 위탁처리 공동자원화시설은 35%의 비율로 나누어져 처리·운영되는 것으로 나타났다. 대부분의 NS지역 가축분뇨 자원화는 위탁처리의 공동자원화시설과 개별농가 퇴비화 시설을 통해(약 81%) 처리되고 있다. NW지역의 가축분뇨 처리현황은 개별농가 퇴비화(43%), 위탁처리(41%), 개별농가 액비화(14%), 개별농가 정화처리(2%)로 구성되어 있으며 NS와 마찬가지로 개별농가 퇴비화시설과 위탁으로 운영되어지는 공동자원화시설이 총 84%로 주를 이룬다. 공공처리장이 없어 가축분뇨의 정화·방류처리는 소수의 개별농가 정화방류시설을 통해 하천에 방류되는 것으로 나타났다. YC지역의 가축분뇨 처리현황은 공동자원화시설이 없어 대부분의 가축분뇨는 개별농가 자원화시설에서 퇴·액비로 자원화 처리되고 있고(퇴비와 액비 각각 18% 와 66%; 총 84%), 나머지는 개별농가 정화처리(7%)를 통한 방류 또는 공공처리장(9%)을 통해 하천으로 정화·방류되고 있다. YC에서 발생하는 가축분뇨 중 돈분뇨의 발생량이 가장 많으며 개별농가 액비화시설을 통해 주로 처리되고 있음을 확인할 수 있다. JJ의 가축분뇨 처리현황은 YC과 마찬가지로 공

동자원화시설이 없어 개별농가 자원화시설에서 가축분뇨의 대부분이 퇴·액비로 처리되고 있으며 특히 액비의 비율이 높다. 이는 가축사육두수 특성에서도 알 수 있는데 약 6만두에서 발생하는 돈분뇨는 연간 총 113,751 톤으로 다른 축종에 비해 많은 양을 차지하고 있다. 구성 비율을 보면, 개별농가 퇴비화(15%), 개별농가 액비화(83%), 개별농가 정화처리(2%)이며 공공처리장은 설치·운영 되고 있지 않다. 경축순환농업 모델을 제시를 위한 지역 특성의 요인들로 전술한 가축사육 두수, 가축 중, 가축분뇨 발생량, 가축분뇨 처리현황과 더불어 작물 중 및 농경지 면적까지 포함하였다. 본 연구에서는 네 곳의 대상지역 중 경축순환농업이 활성화된 NW과 NS지역을 바탕으로 상대적으로 부진한 지역인 YC과 JJ 지역의 문제점을 인식하고 전술한 지역적 요인을 고려한 경축순환농업 모델(안)을 제시하였다.

2.3 가축분뇨 유래 질소, 인, 칼리의 흐름분석

일반적으로 농가로부터 수거되는 또는 발생하는 한육우분과 계분은 함수율이 낮은 형태로 처리된다. 보통 한육우 분뇨는 깔개를 투입시켜 줌으로써 함수율을 낮추고, 계분은 그 자체로 함수율(70~80%)이 낮아 고상물의 형태로 처리되어 퇴비의 생산에 주로 이용된다. 반면 돈분의 경우 함수율이 약 96%로 높기 때문에 돈분뇨로부터 생성되는 비료는 고액분리를 통해 액비와 퇴비로 나뉜다. T_{LF} 는 액비의 총량을 의미하며 총 액비량은 발생된 돈슬러리량과 고액분리비율 중 액상의 비율(p)을 곱하여 산정한다. 본 연구에서 p 값은 0.9를 사용하였다.

$$T_{LF} = p \sum_i^n a_i \quad (2)$$

일반적으로 돈분의 고형분, 함수율이 낮은 우분과 계분은 퇴비를 만드는데 함께 이용된다. 일반적으로 퇴비화과정 중 첫 번째 단계인 전처리 과정에서 수분조절의 목적으로 톱밥 또는 왕겨가 추가되나 현장조사에 따르면 고액분리가 잘 이루어진 돈분은 함수율이 적당하여 수분조절을 위한

톱밥을 거의 사용하지 않는 것으로 나타났다.

$$T_{SF} = (1-p) \sum_i^n a_i + \sum_i^n b_i + \sum_i^n c_i + \sum_i^n d_i + SD \quad (3)$$

여기서 SD는 연간 공급되는 톱밥의 양을 나타낸다. 또한 식(1)을 참고하면 $a_i = f_{a_i} \times mp_a$ 으로 i 농가에서 1년 동안 생산되는 가축분뇨의 총량이다. T_{LF} 는 1년에 생산되는 해당지역의 액비 총량이고, T_{SF} 는 1년에 생산되는 해당지역의 퇴비 총량이다. 일반적으로 분뇨에 포함된 원소 X에 대해서, 각 분뇨의 종류마다 원소 X가 얼마만큼 포함되어 있는지 알 수 있다면, 생성되는 원소 X의 총량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} T_{1,X} \\ T_{2,X} \\ \vdots \\ T_{n,X} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{a_1} f_{b_1} f_{c_1} f_{d_1} \\ f_{a_2} f_{b_2} f_{c_2} f_{d_2} \\ \vdots \\ f_{a_n} f_{b_n} f_{c_n} f_{d_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} mp_a (X_{a,l} + X_{a,s}) \\ mp_b X_b + sd_b X_{sd} \\ mp_c X_c + sd_c X_{sd} \\ mp_d X_d \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 X_{sd} ; the amount of nutrient contained in saw dust

$X_{a,b,c,d}$; the amount of nutrient contained in each livestock manure

각 농가에서 생성되는 가축분뇨에 포함된 주요 원소의 총량은 다음과 같이 나타낼 수 있다. $N_{a,l}$ 은 돈분 유래 액비의 질소, $N_{a,s}$ 는 돈분 유래 퇴비의 질소 함량을 의미한다. 마찬가지로 P_a 는 인, K_a 는 칼리를 각각 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} T_{1,N} \\ T_{2,N} \\ \vdots \\ T_{n,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{a_1} f_{b_1} f_{c_1} f_{d_1} \\ f_{a_2} f_{b_2} f_{c_2} f_{d_2} \\ \vdots \\ f_{a_n} f_{b_n} f_{c_n} f_{d_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} mp_a (N_{a,l} + N_{a,s}) \\ mp_b N_b \\ mp_c N_c \\ mp_d N_d \end{pmatrix} ; N \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} T_{1,P} \\ T_{2,P} \\ \vdots \\ T_{n,P} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{a_1}f_{b_1}f_{c_1}f_{d_1} \\ f_{a_2}f_{b_2}f_{c_2}f_{d_2} \\ \vdots \\ f_{a_n}f_{b_n}f_{c_n}f_{d_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} mp_a(P_{a,l} + P_{a,s}) \\ mp_bP_b \\ mp_cP_c \\ mp_dP_d \end{pmatrix}; P \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} T_{1,K} \\ T_{2,K} \\ \vdots \\ T_{n,K} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{a_1}f_{b_1}f_{c_1}f_{d_1} \\ f_{a_2}f_{b_2}f_{c_2}f_{d_2} \\ \vdots \\ f_{a_n}f_{b_n}f_{c_n}f_{d_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} mp_a(K_{a,l} + K_{a,s}) \\ mp_bK_b \\ mp_cK_c \\ mp_dK_d \end{pmatrix}; K \quad (7)$$

따라서 돈분뇨로부터 생성된 액비 내의 원소 X의 총량을 구해보면,

$$T_{LX} = r_{x,p}X_{a,i}mp_a \sum_i^n f_{a_i} = r_{x,p}X_{a,i} \sum_i^n a_i \quad (8)$$

퇴비 내의 원소 X의 총량은

$$T_{SX} = r_{a,s}[(1-p)X_{a,s}mp_a \sum_i^n f_{a_i} + (X_bmp_b) \sum_i^n f_{b_i} + (X_cmp_c) \sum_i^n f_{c_i} + X_dmp_d \sum_i^n f_{d_i}] \quad (9)$$

여기서 $r_{a,l}$ 은 돈분뇨의 액상분 가공과정에서의 손실보정계수(correction factor), $r_{a,s}$ 은 가축분뇨의 고형분 가공과정에서의 손실보정계수를 각각 나타낸다. 액상분 또는 고형분에서의 손실은 분뇨의 종류에 관계없이 동일하다고 가정한다. 따라서 이하 보정계수는 r로 통일하여 사용하였다. 본 연구에서 액비의 호기성 처리과정 중 질소 손실은 약 32%를 사용하였다. 돈사 체계에 따라 질소 손실율이 달라지는데 깔개를 넣어 키우는 돈사가 각각 25%, 50%의 질소 손실을 보였다⁴⁾. 이 후 저장 단계에서 약 10% 추가적인 질소 손실을 보이는데 이는 돈사에서 처리되는 과정까지 평균 30%의 질소 손실이 발생하는 것을 의미한다. 현장조사에서 나온 데이터 (처리

과정 전의 질소량과 처리 후의 질소량) 역시 비슷한 수치를 나타냈는데 이를 적용해 질소 손실을 산출해 보면 약 34%의 질소 손실을 보였다. 따라서 평균 32%의 질소 성분이 액비화과정중에 공기 중으로 휘산된다고 가정하고 나머지 값을 계산하였다. 고상물 퇴비화 과정의 경우 질소 손실은 약 29%로 책정하였다. 20~40% 질소가 퇴비화 과정 중에 소실되고, Sommer(2001)의 실험에 의하면 가축분뇨의 퇴비화 과정에서 약 28%의 질소 손실이 발생했다고 보고하였다⁵⁾. 가공된 퇴·액비의 농경지 환원 시 농지 표면에 직접 살포하는 방식을 택한 경우, 액비의 질소 손실 발생량은 약 33%로, 퇴비는 약 20%의 질소 성분이 지표면 살포시 소실될 것으로 가정한다^{4),6)}. 가축분뇨 자원화 과정에서 인산과 칼리의 자원화 활용률은 인산 90~100%, 칼리 90~100%를 참고하였고, 이 중에서 최저 활용률을 적용해, 인산과 칼리 약 10%가 미활용된 90%를 각각의 보정계수로 적용하였다⁷⁾.

사례 지역의 작물별 재배 면적과, 작물별 면적당 질소, 인, 칼리 요구량 값을 이용하면 사례 지역에 필요한 양분의 연간 필요량을 계산할 수 있다. 양분 X의 연간 필요량을 T_{RX} (톤/년), 작물 y의 재배면적을 a_y (ha), 작물 y의 단위 면적당 양분 X의 필요량을 $m_{X,y}$ (kg/10a)라고 하면

$$T_{RX} = \sum_y^n (a_y m_{X,y} \div 10 \times 1000) \quad (10)$$

양분 X의 연간 필요량 T_{RX} 와 퇴비와 액비를 통해 작물에 공급되는 양분 X의 총량 T_{TX} 의 차이를 비교하면 비료의 추가 투입 여부를, 또는 가축분뇨 퇴·액비에 포함된 양분의 과다 투입으로 인한 환경부하 여부를 결정할 수 있다.

양분 X의 화학 비료 추가 투입 필요량을 A_X 라고 하면

$$A_X = \begin{cases} T_{RX} - T_{TX} & (T_{RX} \geq T_{TX}) \\ 0 & \end{cases} \quad (11)$$

양분 X가 과다 투입되는 경우 환경부하를 B_X 라고 하면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다 (환경부하의 경우 N, P만 고려하고, K는 고려

하지 않음).

$$B_X = \begin{cases} T_{TX} - T_{RX} & (T_{TX} > T_{RX}) \\ 0 & \end{cases} \quad (12)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 모델(안) 제시

설문조사 및 인터뷰를 통한 JJ지역의 축산 및 경종농가의 특징을 검토한 결과 JJ지역은 축산농가 수가 적고 농가 규모가 작은 반면, 퇴·액비 살포 대상 농지는 상대적으로 충분한 편으로 나타났다. 축산농가 차원의 자원화 경험 및 인식이 있는 편이며, 액비유통센터의 가축분뇨 수거 및 살포가 이루어지고 있었고, 공동자원화시설은 부지 선정 및 건립추진 중에 민원으로 인하여 잠정 중단된 상황이었다. 한편 사례지역 중 JJ지역은 인구 및 인구 밀도가 가장 높았고 인구, 토지, 경제적 상황, 사회 지표 등 몇 가지 지표를 종합적으로 검토하여 판단한 도시화율⁸⁾도 92%로 타 도시가 60% 내외 수준임에 비추어 볼 때 매우 높은 것으로 나타났다. 이처럼 JJ의 상대적으로 높은 도시화 수준은 일반적인 모델로의 경축순환 농업 체계구축을 어렵게 할 뿐 아니라, 행정적으로도 공동자원화시설 건립 및 축산농가 지원 등의 사안을 과감히 추진하기 어렵게 만드는 주요 요인이 되고 있는 것으로 판단된다. 따라서 JJ지역의 공동자원화시설은 퇴액비화 모델이 아닌 에너지화 모델로의 추진이 보다 효과적인 것으로 판단된다. 에너지화 공동자원화시설은 '1일 70톤 이상 가축분뇨(70%) 등을 활용하여 바이오가스, 고체연료 등의 에너지를 생산한 후 퇴액비 등으로 자원화 할 수 있는' 시설을 의미한다⁹⁾. 이는 특히 도시화 수준이 높은 JJ지역에서 가축분뇨 처리에 대한 유력한 민원 해소 방안이 될 수 있다. 가축분뇨와 더불어 음식물 쓰레기 등을 함께 처리함으로써 지역사회에 꼭 필요할 뿐 아니라 시민 모두가 관련 주체인 시설로 자리매김할 수 있기 때문이다. 이러한 가축분뇨와 음식물 쓰레기의 혼합방식은 민원 감소 효과뿐 아니라, 기술적으로 에너지 생산 효율성의 제고도 가능한 것

으로 알려져 있다¹⁰⁾.

YC는 축산농가의 수가 많고 규모도 큰 편이나 경종부분이 상대적으로 적어 경축순환농업이 활성화될 시 액비살포 대상농지의 확보 문제가 대두될 가능성이 높은 것으로 나타났다. 축산농가 차원의 자원화경험 및 인식이 일천한 수준이며, 오히려 정화방류 처리에 대한 관심과 경험이 더 많은 실정이다. 이러한 상황을 고려하면 YC가 정화처리 및 에너지화로의 방향성은 어느 정도 현장의 고충이 반영되어 있으며 나름의 합리성을 갖춘 대책인 것으로 판단된다. 자원화 방향과는 다소 상이할 수 있는 이상의 여러 여건에도 불구하고 한 가지 주목할 만한 특성은 YC의 축산농가가 몇 개의 소수면에 밀집해 있다는 사실이다. 즉, 중규모(30톤 내외)의 분산형 공동자원화시설 3~4개를 이들 축산농가가 밀집된 면에 설치하는 모델의 가능성을 타진해볼 수 있을 것으로 판단된다. 축산농가들의 이용효과 증대와 운송비 절감 등의 효과를 가져올 뿐 아니라, 축산농가 사이에 공동자원화시설이 위치함으로써 민원 발생의 소지도 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 또한 YC지역의 넓은 면적을 감안할 때, 이러한 모델은 저장용량의 대형화에 따른 비용절감 수준보다 이용자의 분산입지에 따른 수거, 저장, 살포시의 빈번한 분뇨반입과 반출로 과잉 수송비 발생 가능성이 더 큰 점에 대한 우려도 해소시킬 수 있는 방안이다.

3.2 가축분뇨 유래 질소, 인, 칼리 흐름 분석

식(1)을 이용하여 자원화시설로 반입되거나 농가 자체적으로 처리하는 가축분뇨의 사례지역별 연간 총 발생량은 [Table 2]와 같다. 가장 많은 가축분뇨 발생량을 보이는 지역은 NS였으며 돼지의 사육두수로부터 기인한 결과이다. NW도 총 발생량에서 NS와 크게 차이나지는 않았지만 한우와 닭·오리에서 발생하는 가축분뇨량이 상대적으로 많은 것으로 조사되었다. 가장 적게 가축분뇨가 발생한 지역은 JJ이고 YC는 닭·오리의 사육두수는 적었으나 돼지와 한우 두수가 다른

지역에 비하여 많아 많은 양의 가축분뇨가 발생하였다.

NW의 가축분뇨 처리현황은 공동자원화시설이 전체 가축분뇨처리의 41%를, 개별농가 자원화시설은 57%를 차지한다. 이를 고려한 식(8)과 식(9)을 이용하여 1년간 생산되는 가축분뇨가 자

원화시설을 거쳐 NW의 농경지에 환원되는 퇴비와 액비 내 질소, 인산, 칼리의 정량은 [Table 3]에 나타나 있다. 1년간 생산되는 가축분뇨가 자원화시설을 거쳐 NW의 농경지에 환원되는 퇴비 내 질소량은 2,769톤/년, 인산은 2,459톤/년, 칼리는 2,031톤/년으로 액비에서 발생하는 질소,

[Table 2] livestock Manure Production by sampling sites

Species	NW		NS		YC		JJ	
	number of head	amounts (ton/yr)	number of head	amounts (ton/yr)	number of head	amounts (ton/yr)	number of head	amounts (ton/yr)
Korean Beef	37,309	186,564	22,029	110,156	43,350	216,772	11,372	56,866
Dairy Cow	2,711	37,305	4,283	58,936	2,839	39,066	2,251	30,975
Pig	110,304	205,331	188,357	350,627	199,269	370,939	61,107	113,751
Poultry	6,599,495	289,058	4,610,270	201,930	1,698,411	74,390	1,340,014	58,693
total	6,749,819	718,257	4,824,939	721,649	1,943,869	701,167	1,414,744	260,284

[Table 3] Three primary nutrients (N, P₂O₅, K₂O) production in sampling sites

Site	Type of fertilizer	ton/yr		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NW	Compost	2,769(80.8) ¹	2,459(94.4)	2,031(70.2)
	Liquid fertilizer	660(19.2)	147(5.6)	864(29.8)
	Total	3,429(100)	2,606(100)	2,895(100)
NS	Compost	1,798(64.5)	1,671(88.4)	1,409(52.1)
	Liquid fertilizer	989(35.5)	220(11.6)	1,295(47.9)
	Total	2,788(100)	1,891(100)	2,704(100)
YC (present)	Compost	1,206(54.1)	1,617(87.7)	888(39.9)
	Liquid fertilizer	1,022(45.9)	227(12.3)	1,338(60.1)
	Total	2,228(100)	1,844(100)	2,226(100)
JJ (present)	Compost	675(60.5)	754(90.3)	570(54.3)
	Liquid fertilizer	441(39.5)	81(9.7)	479(45.7)
	Total	1,116(100)	835(100)	1,049(100)
YC ² (after model applied)	Compost	1,169(53.7)	1,732(87.7)	951(39.9)
	Liquid fertilizer	1,007(46.3)	243(12.3)	1,433(60.1)
	Total	2,175(100)	1,975(100)	2,385(100)
JJ ² (after model applied)	Compost	643(65.3)	761(90.3)	576(54.3)
	Liquid fertilizer	342(34.7)	82(9.7)	483(45.7)
	Total	985(100)	843(100)	1,060(100)

¹ the value in the parenthesis indicates percentage of the total N, P₂O₅, K₂O, respectively.

² nutrients mass flow after models are applied in each sites respectively.

인, 칼리 양은 퇴비에 비하여 적었다. 양분의 총 발생량을 기준으로 가축분뇨 유래 인산과 칼리가 질소에 비해 상대적으로 많이 발생하는 NW지역의 특성상 고구마, 토마토, 오이 등 인산과 칼리의 양분요구량이 많은 작물을 확대 재배하는 것이 양분순환측면에서 좋을 것으로 사료된다. 여기서 사용된 양분요구량은 작물별 시비처방 기준⁸⁾에서 제시된 자료를 참고하였다. NS의 가축분뇨 유래 퇴·액비가 함유하고 있는 질소, 인산, 칼리의 농경지 환원 정량분석은 공동자원화의 35%, 개별농가 퇴·액비시설의 51%, 나머지 하천으로의 정화·방류처리를 고려하여 산정하였다. NS지역의 질소와 인은 액비보다 퇴비에서 더 많이 발생한 반면, 칼리의 경우 퇴비와 액비에서 큰 차이가 나지 않았다. 일반적으로 비료의 시비량을 정할 때 질소 또는 인이 기준임을 고려하면 액비보다는 퇴비 내 양분흐름에 더 많은 주의가 필요할 것으로 사료된다. 양분 총 발생량을 살펴보면, 가축분뇨 유래 질소와 칼리성분이 인산에 비하여 상대적으로 많이 발생하므로, 토마토, 오이, 호박, 고추, 파, 감 등의 질소와 칼리 요구량이 많은 작물위주로 확대 재배하는 것을 고려해볼 필요가 있다.

YC지역은 공동자원화시설이 운영되지 않는 개별농가 자원화시설 만을 통한 가축분뇨 처리를 하고 있었으며, 전체 대비 84%를 차지한다. 이를 고려하여 1년간 생산되는 가축분뇨가 자원화시설을 거쳐 YC의 농경지에 환원되는 퇴비와 액비 내 질소, 인산, 칼리의 총량은 각각 2,228 ton/yr, 1,844 ton/yr, 2,226 ton/yr으로 나타났다. 질소는 액비와 퇴비에서 비슷한 비율로 생성

되었고, 인산의 경우 퇴비에서 대부분이 발생하였다. 다른 지역에서도 마찬가지로 액비가 포함하고 있는 인산량은 적다. 대부분이 노(urea)로 이루어진 액비의 특성 때문인데, 돼지분뇨의 인산분포도는 9:1의 비율로 분과 노에 각각 포함되어 있다¹²⁾. 마지막으로 JJ지역의 경우, 가축분뇨 공동자원화시설은 설립되어 있지 않고, 오로지 개별농가 퇴·액비시설을 통해 자원화가 이루어지고 있는 것으로 조사되었다. 하지만 자원화율은 전체 대비 98%이며 나머지 2%는 정화되어 하천으로 방류처리 되어 농경지에 환원되는 가축분뇨 유래 질소와 칼리 성분이 인산에 비하여 상대적으로 많이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 전술한 모델(안)을 바탕으로 YC와 JJ지역의 경축순환농업 모델을 적용하기 위해 공동자원화시설이 차지하는 비중을 전체 처리대비 약 38%(NW과 NS지역의 평균 값)로 가정하였고 나머지는 YC와 JJ지역의 기존 처리시설비율을 그대로 반영하여 처리량을 분배하였다.

기존 처리현황 대비 공동자원화시설이 적용된 시나리오의 양분흐름을 비교해보면 두 지역 모두 인과 칼리량은 늘어나고(최대 7%까지) 질소량은 감소하는(최대 15%까지) 경향을 보이는 것으로 나타났다[Table 3]. 모델이 적용된 YC지역의 가축분뇨 유래 질소, 인산, 칼리는 전반적으로 비슷하게 고른 값을 보이고 있으나, 작물의 양분요구량과 양분의 토양환원량을 비교해 보면 연간 질소가 719톤, 인이 1,269톤씩 각각 과잉 공급되고 있음을 알 수 있다[Table 4]. 토마토, 오이, 호박, 미나리, 마늘 등의 N, P 요구량이 많은 작물위주로 확대재배하는 것을 고려해 볼 필

[Table 4] Additional Chemical Fertilizer Requirement(A_X) and Excessive N and P_2O_5 (B_X)in YC and JJ Site

Site	A_X		B_X	
	N	P_2O_5	N	P_2O_5
	----- ton/yr -----			
YC	0	0	719	1,269
JJ	671	0	0	32

요가 있다. JJ지역의 경우 작물 양분요구량 대비 질소 671톤/년의 추가공급이 필요할 것으로 추정되며 이는 화학 비료로 대체될 수 있음을 의미한다. 인의 경우 32톤이 과잉 공급되어 JJ와 YC 지역 모두 인의 지표유출(runoff)에 기인한 부영양화(eutrophication)를 고려하여 경축순환농업 모형을 구축해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 공동자원화시설, 공공처리시설, 개별 농가의 현장 또는 설문조사를 통하여 우리나라 경축순환농업의 현황 및 수준을 파악하고, 상대적으로 부진한 지역을 고려한 경축순환모형(안)을 제시하여 가축분뇨 유래 양분의 흐름, 즉 양분 수지분석을 통해 경축순환농업 모형의 기초자료 확보를 목적으로 실시하였다. 지역 특성을 고려한 경축순환농업 모형을 제시하기 위하여 지역의 가축사육 두수, 가축 종, 가축분뇨 발생량, 가축분뇨 처리현황, 농경지 면적에 대한 조사가 선행되었다. NW의 경우 가축분뇨 유래 인산과 칼리가 질소에 비해 상대적으로 많이 발생하였고 NS과 JJ의 가축분뇨 유래 질소와 칼리성분은 인산에 비하여 상대적으로 많이 발생하는 특징을 보였다. YC에서는 가축분뇨 유래 질소, 인산, 칼리가 전반적으로 비슷하게 고른 값을 가지는 특징을 보였다. NS, NW에 비하여 JJ, YC지역은 해양배출을 해오면서 경축순환농업에 대한 경험이 상대적으로 미숙하였고, 그 결과 두 지역 모두 공동자원화센터와 같은 처리시설이 없어 가축분뇨자원화에 더 많은 어려움을 겪고 있었다. JJ의 경우 도시화 비율이 상대적으로 높은 지역특성을 고려하여 경축순환농업 모형(안)은 퇴·액비시설과 에너지화 시설을 공동추진하는 two-track 모델이 적합한 것으로 판단하였다. YC의 경우에는 일부 읍/면에 축산산업이 집중되는 현상을 보이고 있고, 3천두 이상의 대농의 경우 정화처리시설을 개별적으로 갖추고 있어 분산형 공동자원화시설을 제시해 보았다. YC의 양축농가가 몇 개의 소수 읍·면에 밀집해 있다는 사

실에 착안, 중규모(30톤 내외)의 분산형 공동자원화시설 3~4개를 이들 읍·면에 설치하는 모델이다. 기존 처리현황 대비 공동자원화시설이 적용된 시나리오의 양분흐름을 살펴보면 YC와 JJ 두 지역 모두 가축분뇨 유래 인성분이 증가하는 경향을 보여 향후 인의 지표유출(runoff)로 인한 부영양화(eutrophication) 등 환경부하를 저감하는 경축순환농업모형이 필요할 것으로 사료된다. 특히 사례지역 경축순환자원화 체계의 양분흐름 수확 모형화 수립을 통하여 가축분뇨 발생량부터 처리, 토양환원 및 식물흡수에 이르기까지의 양분수지 예측 tool을 제공하고 이를 바탕으로 유기성 폐자원의 바이오에너지가 분석을 위한 기초자료 연구가 진행되어야 할 것이다.

사사

본 논문은 농림축산식품부 연구개발사업(과제번호 311061-3)과 KEITI의 기술료사업(과제번호 2013001470005)의 지원에 의해 이루어진 연구결과의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Peyraud, J.L., Taboada, M., Delady, L., "Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: A review", *Europ. J. Agronomy*, 57:31-42, (2014).
2. Bell, L.W., Moore, A.D., Kirkegaard, J.A., "Evolution in crop-livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia", *Europ. J. Agronomy*, 57:10-20, (2014).
3. Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P.C. de Faccio., Dedieu B., "Integraed crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality", *Agriculture, Ecosystems and Environment*,

- 190:4-8, (2014).
4. Rotz, C.A., "Management to reduce nitrogen losses in animal production", J. Anim. Sci., 82:119-137, (2004).
 5. Sommer, S.G., "Effect of composting on nutrient loss and nitrogen availability of cattle deep litter", European Journal of Agronomy, 14:123-133, (2001).
 6. University of Minnesota Extension Fact Sheet. "Nitrogen availability from liquid swine and dairy manure: Results of on-farm trials in Minnesota", UM Extension Bulletin 08583, (2006).
 7. Midwest Plan Service. Livestock Waste facilities Handbook, MWPS-18 (1993).
 8. e-나라지표, 에너지 수급현황, (2013)
http://www.index.go.kr/egams/stts/jsp/potal/stts/PO_STTS_IdxMain.jsp?idx_cd=1200&bbs=INDX_001&clas_div=A
 9. 농림축산식품부, 가축분뇨처리지원사업, (2011)
http://www.mafra.go.kr/cms/util/contentsFileDown.jsp?board_id=19&FILE_NAME=2011.
 10. Lee S. G., Choi H. L, and Lee J. H., "Effect of food waste properties on methane production", J. of KORRA, 22:11-22, (2014).
 11. 농촌진흥청 국립농업과학원, 작물별시비처방 기준, (2010).
 12. 농촌진흥청, 가축분뇨 발생량 및 주요성분 재설정 연구, (2008). 