

가축분뇨 퇴비·액비의 비료성분 및 중금속 함량에 관한 연구

안태웅^{1a,*} · 김동민^{1b} · 이흥수² · 신현상³ · 정유진⁴

¹(주)엔솔파트너스 · ²환경보전협회 · ³서울과학기술대학교 환경공학과 · ⁴국립환경과학원

A Study on the Nutrient Composition and Heavy Metal Contents in Livestock Manure Compost · Liquefied Fertilizer

Ahn Tacung^{1a,*} · Kim Dongmin^{1b} · Lee Heungsoo² · Shin Hyunsang³ · Chung Eugene⁴

¹Environment Solution Partners

²Environmental Preservation Association

³Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

⁴National Institute of Environmental Research

(Received 18 June 2021, Revised 27 July 2021, Accepted 27 July 2021)

Abstract

The application of organic fertilizer could be accompanied by potential hazards to soil and humans due to trace metals. Livestock manure compost · liquefied fertilizer is a well-established approach for the stabilization of nutrients and the reduction of pathogens and odors in manures, which can be evaluated as compost · liquefied. In this study, the livestock manure compost · liquefied fertilizers produced at 333 liquid manure public resource centers and liquid fertilizer distribution centers were collected from May to December 2019. The nutrient content (nitrogen, phosphorus, and potassium), physicochemical properties, and heavy metal content were investigated. The livestock manure compost · liquefied fertilizer was measured using a mechanical maturity measurement device. The organic matter, arsenic, cadmium, mercury, lead, chromium, copper, nickel, zinc, *E. coli* (O157:H7), *Salmonella*, etc. of the livestock manure compost · liquefied fertilizers were analyzed. The average heavy metal content in the livestock manure compost · liquefied fertilizer was as follows: Cr 2.9 mg/kg (0.2~8.7 mg/kg), Cu 20.4 mg/kg (1.6~74.1 mg/kg), Ni 1.3 mg/kg (0.4~4.2 mg/kg), and Zn 79.8 mg/kg (3.0~340.7 mg/kg). Although large-scale organic fertilizer plants and resources recycling centers produce good organic (liquid) fertilizers with proper components, it is necessary to standardize livestock manure compost · liquefied fertilizer in order to facilitate efforts to turn livestock manure into useful resources.

Key words : Compost · liquefied fertilizer, Heavy metal, Livestock manure, Livestock manure management, Maturity degree

^{1a,*} Corresponding author, 차장(Deputy General Manger), ahntu@naver.com, https://orcid.org/0000-0002-5492-2591

^{1b} 과장(General Manger), kdmv999@naver.com, https://orcid.org/0000-0002-2520-6131

² 차장(Deputy General Manger), hsleewater@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1642-0110

³ 교수(Professor), hyuns@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-5197-8645

⁴ 연구관(Senior Researcher), egchung@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-4053-4790

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

가축분뇨의 관리정책은 초기에는 가축분뇨를 폐수로 인식하여 수질오염 방지 중심의 정화처리 위주로 추진되었으나 해양배출 금지, 축산업 대규모화 등 국내·외 환경 변화에 따라 가축분뇨가 자원화 개념으로 전환되면서 퇴·액비 처리 위주로 추진됐다. 2009년 런던협약 의정서 가입, 2012년 가축분뇨 해양투기 금지, 한미 FTA, 축산업 대규모화 등 국내외 환경 변화에 따라 가축분뇨가 자원화 개념으로 전환되면서 2004년 농림축산식품부와 환경부의 합동으로 수립한 '가축분뇨 관리 이용대책'에 의해 가축분뇨 자원화를 촉진하는 계기가 마련되었다. 또한, 2006년 「가축분뇨 관리 및 이용에 관한 법률」 제정에 따라 가축분뇨 자원화의 제도적 기반이 마련되면서 가축분뇨를 퇴·액비로 자원화하여 자연순환농업을 활성화하는 것을 중점으로 추진되어 왔다(KEI, 2019).

환경부에서 발간한 가축분뇨 발생 및 처리현황 통계(2020년)에 의하면 주요 축종(한우, 젓소, 돼지, 닭)의 경우 201,745개소의 축산농가에서 264,477천두의 소, 돼지 등을 사육하고 있으며, 전년에 비해 한우 및 돼지의 사육은 소폭으로 증가하고, 우유의 소비량 감소로 인한 젓소의 사육은 감소 추세를 보이고 닭의 사육은 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 또한, 가축사육 두수가 증가됨에 반해 소규모 축산농가는 감소하고 있는 추세이며, 대형화, 집약화 등 기업화 추세가 지속되고 있는 실정이다. 주요 축종의 가축분뇨 발생량은 2012년부터 2017년까지 약 17만 m³/일을 유지하다가 2018년에는 185,096 m³/일로 증가하는 경향을 보였다. 가축분뇨 발생량은 원단위가 큰 돼지 등의 사육두수에 크게 의존하며, 돼지의 사육두수가 증가함에 따라 가축분뇨 발생량도 함께 증가하고 있는 경향을 보였다(ME, 2020).

가축분뇨를 퇴비·액비로 자원화하는 현 가축분뇨 정책은 자원화라는 긍정적 측면의 이면에 환경에 여러 가지 부정적인 영향을 주고 있는 것이 현실이다. 통제되지 않는 상황에서 농경지에 퇴비·액비의 무분별한 살포는 필요 이상의 양분(질소 및 인 등)이 토양에 과잉으로 축적되어 강우 시 지하수 및 주변 하천, 호소로 유입되어 수질을 악화시킬 우려가 매우 농후하다(Dupas et al., 2015; Jang et al., 2012). 실제로 우리나라의 양분수지는 다른 OECD 국가에 비해 상당히 높은 편에 속한다(Kim et al., 2005; Kim et al., 2008). 또한 가축분뇨에 고농도로 함유되어 있는 암모니아성 질소는 수생태계에서 독성을 유발시키기 때문에 적정량의 퇴비 액비 살포는 매우 중요하다고 할 수 있다(Alonso and Camargo, 2011; Jeon et al., 2012).

홀스타인 젓소 분뇨의 특성과 비료성분 및 오염물질 부하량 추정 연구에서는 매년 축산농가로부터 발생하고 있는 가축분뇨의 양이 증가하고 있다고 보고했으며, 1990년 초부터는 가축분뇨가 작물의 비료원으로 쓰이는 순기능보다는 환경오염의 한 요인으로 지목되면서 토양, 수질 및 대기오염이라는 역기능이 더 부각됨에 따라 도시 근교의 낙농가, 초지 등을 확보하지 못한 목장, 상수원 보호구역내에 위치한 목장에서는 가축분뇨 처리에 고심하지 않을 수 없게 되었다(Kim

et al., 2004). 특히 체적이 크고 방목지 및 운동장 등의 야외에서 사육되는 경우가 많은 젓소는 다른 가축에 비해 가축분뇨 배설량이 많을 뿐 아니라, 운동장 등 축사 외부에서 활동하는 시간이 많아서 주변으로부터 환경을 오염시키는 주범으로 지목을 받아 왔다. 조사로 생산기반인 동시에 생산된 분뇨를 환원해야 할 경지면적이 협소한 상황에서 이루어진 젓소의 규모확대는 가축분뇨의 토양에 대한 부하를 높게 되었고, 하천의 수질을 오염시키는 환경오염의 주범으로 인식됐다. 이와 같은 대내외적인 요인으로 인해 낙농가들은 목장의 규모와 관계없이, 가축분뇨를 적절하게 처리하는 것이 목장관리에 필수적인 사항으로 인식하게 되었다.

축산업이 기업화·규모화·전업화 되면서 가축분뇨의 발생량 증가에 따라 가축분뇨가 환경오염의 주요 발생원으로 주목되고 있다(NIER, 2013). 가축분뇨의 경우 전체 오·폐수 발생량의 1%이나 유기물 및 질소, 인과 같은 영양염류 등을 다량 함유하고 있어 수질오염부하량이 증가할 수 있고 가축분뇨를 제대로 관리되지 않을 때 수계에 미치는 영향이 크다(Ryu et al., 2012). 2017년 환경부 조사에 따르면 대청호 녹조 발생 주원인인 소옥천 유역 오염부하의 42%(총인 기준)가 소규모 개별농가의 방치된 가축분뇨로 조사되었다. 또한 국내 암모니아 배출량의 79%가 농업 부문에서 배출되는 것으로 나타났는데, 가축분뇨의 퇴·액비 농경지 살포와 방치된 가축분뇨 등이 대표적인 배출경로로 보고되었다(ME, 2010).

가축분 퇴비에서의 총질소, 총인산, 총칼리의 평균함량은 각각 1.73%, 1.88%, 1.66%였고 유기물, 염분, 수분의 평균함량은 각각 38.9%, 40.9%, 1.2%였으며, 크롬, 구리, 니켈, 아연의 평균 함량은 각각 10.59 mg/kg, 114.07 mg/kg, 6.32 mg/kg, 439.30 mg/kg로 조사되었다(Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2007).

양평군 지역의 양축농가에서 팔당상수원 오염에 영향을 미치는 기여도를 조사한 연구에서는 여름철(우기)에 축산에서 기인하는 오염기여도는 T-N 2.8%, T-P 37.5%로 겨울철(갈수기)에 비하여 T-N은 약 3배, 그리고 T-P는 약 8배 정도 높게 나타난다고 보고되었다(Ahn et al., 2001).

Jeong (1996)은 가축분뇨의 발효된 퇴비 화학성분 평균분포로서 pH, 유기물(%), 카드뮴, 납, 철 및 구리는 각각 8.11, 39.5, 0.56, 2.14, 2,103.20 및 113.90 mg/kg으로 보고하였다.

가축분뇨 액비에 관련된 농축산 관련 법률을 통해 가축분뇨 액비의 법적규정을 조사하고 국내 가축분뇨 액비의 이용형태를 분류하기 위해 현장의 사례조사 및 국내외 액비 유통체계에 대한 사례를 조사 후 기존 비료관리제도와 액비품질인증제도간의 단계별 비교를 하였다. 이를 통하여 가축분뇨 액비의 품질을 명확히 구분하여 인증제도를 구축함으로써 액비의 상품화를 유도하여 축산업의 환경적 문제를 해결함과 동시에 향후 축산발전을 위한 계기를 조성하기 위하여 액비품질인증제도에 필요한 목표요소를 도출하였다(Kim et al., 2014; Kim et al., 2018).

본 연구에서는 현재 운영중인 333개소의 가축분뇨 재활용시설을 대상으로 가축분뇨 퇴비·액비의 시료 분석(질소, 인, 칼륨 및 중금속 함량 등)을 수행하였으며, 가축분뇨 퇴비·

액비의 분석결과를 토대로 가축분뇨 퇴비·액비의 공정규격을 초과한 물질에 대한 개연성을 검토하고자 하였다.

2. Materials and Methods

2.1 현장조사 대상 사업장 선정

가축분뇨 재활용 시설에 대한 현장조사 수행을 위해서 전국 지자체에서 제공받은 재활용 시설 현황자료를 토대로 재활용 시설 1,084개소 중 333개소를 선정하였다. 선정원칙은 경기도, 경상도, 제주도 등 지역이 편중되지 않도록 하였고 퇴비, 액비 시료채취 협조가 가능한 재활용 시설을 우선적으로 선정하였다. 333개소를 직접 방문하여 재활용 시설의 담당자와 면담을 통해 설문조사표를 작성하였으며, 현재 운영 중인 재활용 시설의 인력과 장비, 가축분뇨 퇴비·액비의 생산량, 퇴비·액비의 시료 분석(질소, 인, 칼륨 및 중금속 함량 등) 등 현장조사를 수행하였다.

가축분뇨 재활용 시설(퇴비생산시설, 액비유통센터, 공동자원화 시설 등)의 조사대상지점을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 시료 분석 항목 및 방법

가축분뇨 재활용 시설에서 생산되는 퇴비·액비의 성분분석을 통해 각 분석항목별 공정규격의 만족 여부를 파악하고

자 하였다.

가축분뇨 퇴비·액비의 항목별 공정규격 중에서 퇴비는 유기물, 유해성분(비소, 카드뮴, 수은, 납, 크롬, 구리, 니켈, 아연, 대장균 및 살모넬라), 유기물대 질소의 비, 염분, 수분, 부숙도, 염산불용해물, 질소전량 및 암모니아태질소 총 18개 항목을 분석하였으며, 액비는 질소전량, 인산전량, 칼리전량, 유해성분(비소, 카드뮴, 수은, 납, 크롬, 구리, 니켈, 아연, 대장균 및 살모넬라), 염분, 수분, 부숙도 등 16개 항목을 분석하였다.

퇴비의 공정규격은 유기물이 30% 이상이고 유해물질의 건물중 공정규격은 비소 45 mg/kg 이하, 카드뮴 5 mg/kg 이하, 수은 2 mg/kg 이하, 납 130 mg/kg 이하, 크롬 200 mg/kg 이하, 구리 360 mg/kg 이하, 니켈 45 mg/kg 이하 및 아연 900 mg/kg 이하이다. 대장균과 살모넬라의 공정규격은 불검출이다. 또한 유기물대 질소의 비 및 수분의 공정규격은 각각 45 및 55% 이하이고 염분의 건물중 공정규격은 2%이하, 부숙도의 공정규격은 콤포백법의 경우, 부숙완료(70%)이상, 염산불용해물의 공정규격은 25% 이하이다.

액비의 공정규격은 질소전량, 인산전량, 칼리전량 각각의 성분함계량의 공정규격은 0.3% 이상이 되어야 하고 비소는 5 mg/kg 이하, 카드뮴 0.5 mg/kg 이하, 수은 0.2 mg/kg 이하, 납 15 mg/kg 이하, 크롬 30 mg/kg 이하, 구리 50 mg/kg 이하, 니켈 5 mg/kg 이하 및 아연 130 mg/kg 이하이다. 대장균과 살모넬라의 공정규격은 불검출이다. 염분 및 수분의 공정

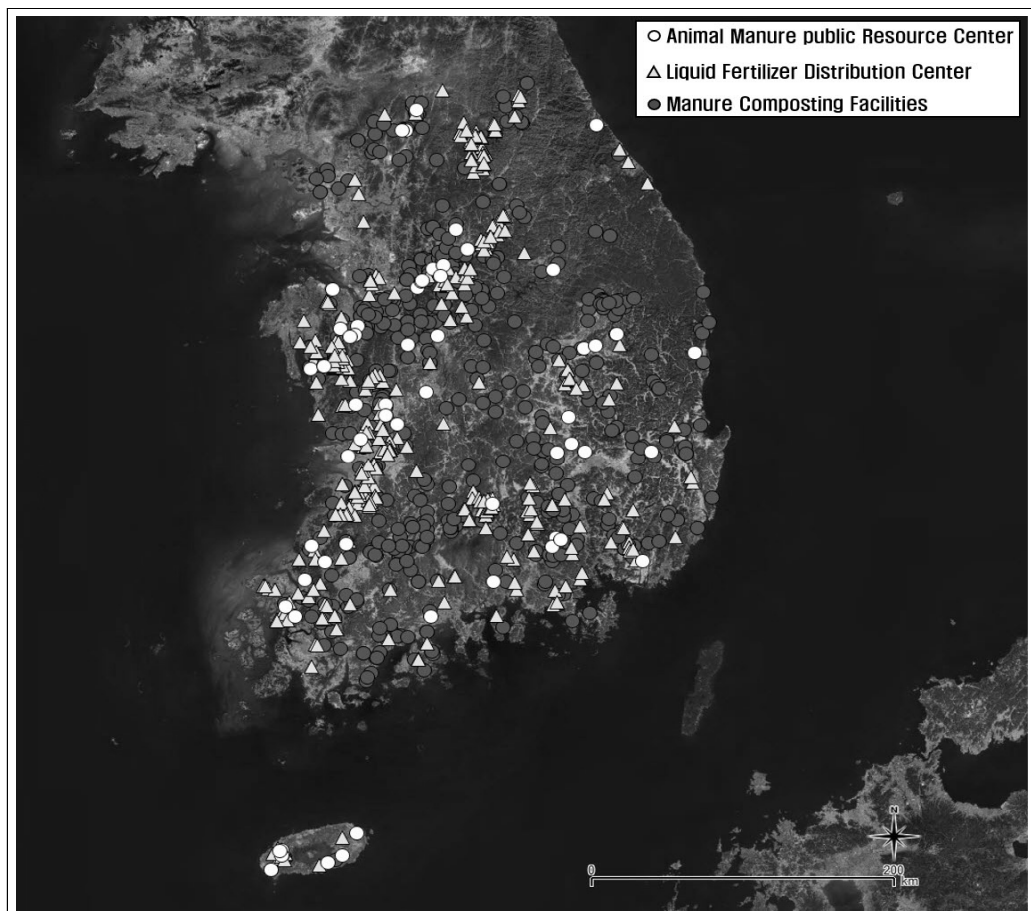


Fig. 1. Survey site of livestock manure compost · liquefied fertilizer.

규격은 각각 0.3% 이하 및 95% 이상이고, 부속도의 공정규격은 부속완료이다.

가축분뇨 퇴비 및 액비의 검사용 시료 채취방법 및 수량, 운반, 보존, 분석은 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준 고시 4조(농촌진흥청 고시 제 1996-6호)의 기준을 준수하였고 분석항목은 품질검사방법 및 시료채취기준 고시 6조(이화학적 검사방법 등)와 7조(판정기준)의 분석방법을 준수하여 시료를 분석하였다.

퇴비 시료의 분석방법은 유기물과 염산불용해물은 회화법, 유해성분 중 비소, 카드뮴, 납, 크롬, 구리, 니켈 및 아연은 원자흡광분광법으로 실시하였다. 또한, 수은은 환원기화법, 대장균과 살모넬라는 미생물시험법(확선도말방법)으로 분석하였다. 염분과 수분은 각각 질산은법과 가열감량법으로 분석하였고, 부속도는 콤팩법이 부속완료가 판정되지 않을 경우, 종자발아법을 추가로 분석하여 반영하였다. 질소전량과 암모니아태질소의 분석은 각각 황산법-켈달법과 증류법으로 실시하였다.

액비 시료의 분석방법은 질소전량 황산법-켈달법, 인산전량, 칼리전량, 비소, 카드뮴, 납, 크롬, 구리, 니켈 및 아연은 원자흡광분광법으로 실시하였다. 또한, 수은은 환원기화법, 대장균과 살모넬라는 미생물시험법(확선도말방법)으로 분석하였다. 염분과 수분은 각각 질산은법과 가열감량법으로 분석하였고, 부속도는 콤팩법이 부속완료가 판정되지 않을 경우, 종자발아법을 추가로 분석하여 반영하였다. 암모니아태질소의 분석은 증류법으로 실시하였다.

3. Results and Discussion

3.1 가축분뇨 재활용 시설의 현장조사 결과

전국에 있는 가축분뇨 재활용 시설을 가축분퇴비 생산기준으로 구분하면 퇴비만 생산, 액비만 생산, 퇴비+액비 모두 생산하는 업체로 구분된다. 재활용 시설을 기준으로 퇴비는 294개소, 액비가 19개소, 퇴비와 액비를 같이 생산하고 있는 10개소를 포함하여 총 333개소에 대해 시설현황 및 건의사항을 조사하였다. 재활용 시설에 대한 현장조사를 수행할 때 퇴비시료 304개, 액비시료 29개 등 총 333개 시료를 채취 분석하였다.

가축분 퇴비 원료는 크게 돈분, 우분, 계분, 마분 등 구분되며 혼합원료와 단독원료 사용으로 구분된다. 혼합원료는 돈우계분이 44.3%로 가장 많은 빈도를 나타냈으며 돈우마분 및 우계마분은 가장 적은 빈도를 나타내었다. 단독원료는 계분이 15.0%로 조사되었으며 우분은 단독원료 중 사용되는 비율은 1.3%로 가장 낮았다. 계분 원료별 특징을 보면 우분, 돈분 보다 높은 비료성분 비율을 보였다. 퇴비원료에 첨가되는 부산물 중 가축분뇨의 높은 수분 함량을 조절하기 위한 수분조절제로 톱밥 및 왕겨 등 가장 일반적으로 활용되고 있다. 수분조절제인 톱밥 및 왕겨의 사용률이 83.6%, 26.0%로 가장 높은 비율을 보였다.

가축분뇨 재활용 시설의 장비보유 현황을 조사한 결과, 제품포장시설(자동포장라인 및 상차로봇)은 벌크(포장하지 않는 가축분퇴비)를 제외하고 평균 1.1대 이상 보유하고 있는 것으로 확인되었다. 혼합시설은 기계교반식(교반기 설치)과

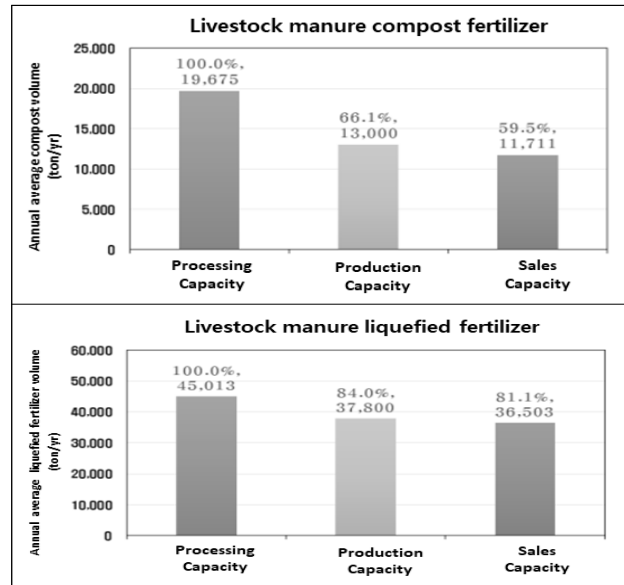


Fig. 2. Annual average livestock manure compost · liquefied fertilizer volume.

퇴적식(교반작업)으로 구분되며 퇴비단을 뒤집어 섞는 시설로 평균 1.6대 이상 보유하고 있는 것으로 조사되었고 송풍시설은 평균 6.3대 이상 보유하고 있는 것으로 조사되었다. 굴삭기는 퇴비운반 및 살포에 이용되며 1.4대 이상 보유하고 있는 것으로 조사되었고 로우더는 퇴비를 짚은 거리에 운반 및 적재에 사용되며 평균 1.8대 이상으로 조사되었다.

가축분뇨 종사인력은 업무별로 관리자, 업무보조, 실제종사자(관리자+업무보조)로 구분하여 조사하였다. 종사인력 중 관리자는 평균 1.8명, 업무보조는 평균 4.8명, 실제종사자는 평균 2.2명으로 조사되었다.

가축분뇨 종사인력의 규모를 조사하기 위해 인원규모별로 조사한 결과, 업체수별 종사인력 현황은 3명 이상 6명 미만 이 48.8%로 가장 높았다.

가축분뇨 재활용 시설을 대상으로 연평균 퇴비 처리용량, 생산량, 판매량을 조사한 결과, 가축분 퇴비는 연평균 19,675 톤/년 생산되어 11,711 톤/년 판매되었고 액비는 연평균 37,800 톤/년 생산되어 36,503 톤/년 판매된 것으로 조사되었다.

3.2 가축분뇨 퇴비·액비의 항목별 시료분석 결과

3.2.1 가축분뇨 퇴비

가축분퇴비 총 304개 시료에 대한 유기물 분석결과, 유기물은 16개 시료(5.3%)를 제외하고, 모두 30% 이상으로 공정규격 기준을 만족하였다. 조사대상시설 중에서 유기물 공정규격 미만인 16개 시설은 19.8~29.7%의 범위로 나타났다.

조사대상시설 중에서 공정규격을 모두 만족하고 있는 항목은 비소(45 mg/kg 이하), 수은(2 mg/kg 이하), 납(130 mg/kg 이하), 카드뮴(5 mg/kg 이하), 크롬(200 mg/kg 이하)으로 확인되었다. 또한 대장균(O157:H7)과 살모넬라도 모두 공정규격(불검출)을 만족하였다.

가축분퇴비 총 304개 시료중에서 구리는 294개 시료가 공정규격(360 mg/kg 이하)을 만족하였고 10개 시설은 369.03~

433.26 mg/kg으로 공정규격을 초과하고 있는 것으로 확인되었다. 또한 니켈도 4개 시설에서 공정규격(45 mg/kg 이하)을 초과하였는데 74.15~127.66 mg/kg로 나타났다.

가축분퇴비 총 304개 시료에 대한 부숙도 분석결과, 부숙도는 2개 시료를 제외하고, 모두 부숙완료로 공정규격 기준을 만족하였다. 부숙도는 기계적부숙도 검사법인 콤팩법으로 시행하였고 미부숙으로 판정될 경우 종자발아법(공정규격: 발아지수 70이상)으로 다시 분석하여 최종적으로 부숙도를 평가하였다.

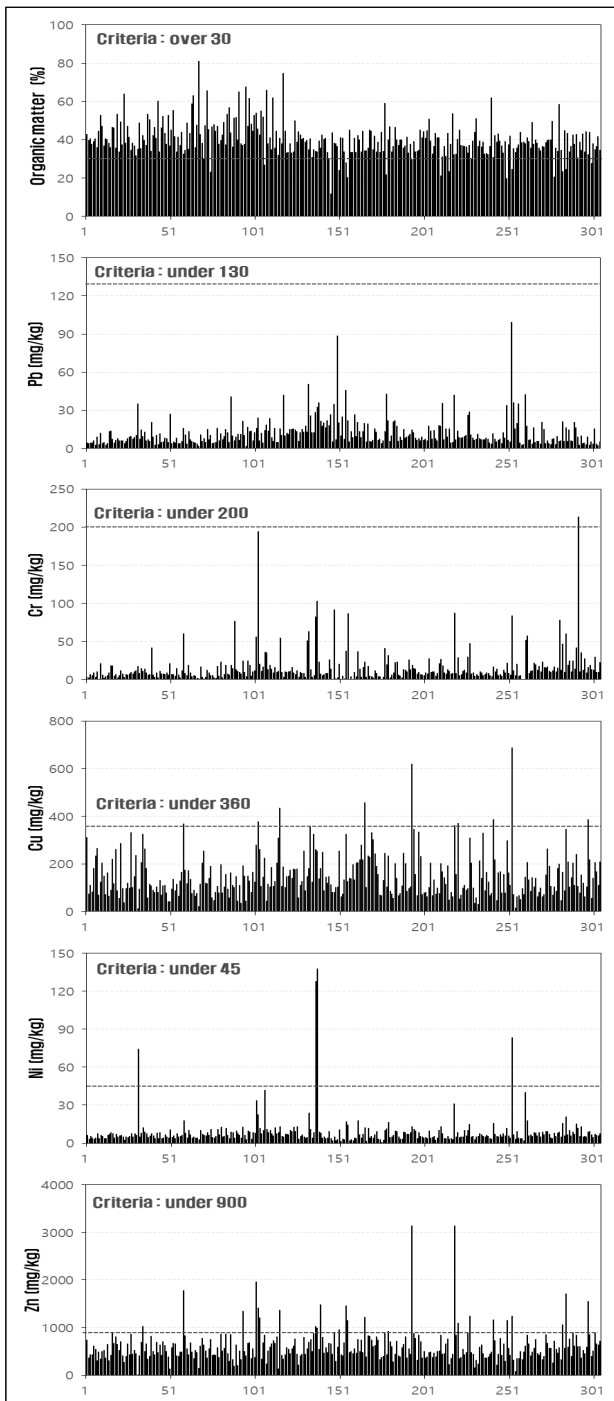


Fig. 3. Analysis result of livestock manure compost.

3.2.2 가축분뇨 액비

가축분뇨 액비의 29개 시료에 대한 질소+인산+칼리 분석결과, 질소+인산+칼리전량은 2개 시료를 제외하고, 모두 공정규격(0.3% 이상)을 만족하였으며, 조사대상시설 중에서 질소+인산+칼리전량의 공정규격 미만인 2개 시설은 0.251과 0.267로 확인되었다.

조사대상시설 중에서 공정규격을 모두 만족하고 있는 항목은 카드뮴(5 mg/kg 이하), 수은(0.2 mg/kg 이하), 납(15 mg/kg), 크롬(30 mg/kg 이하)으로 확인되었다. 또한 대장균(O157:H7)과 살모넬라도 모두 공정규격(불검출)을 만족하였다. 또한

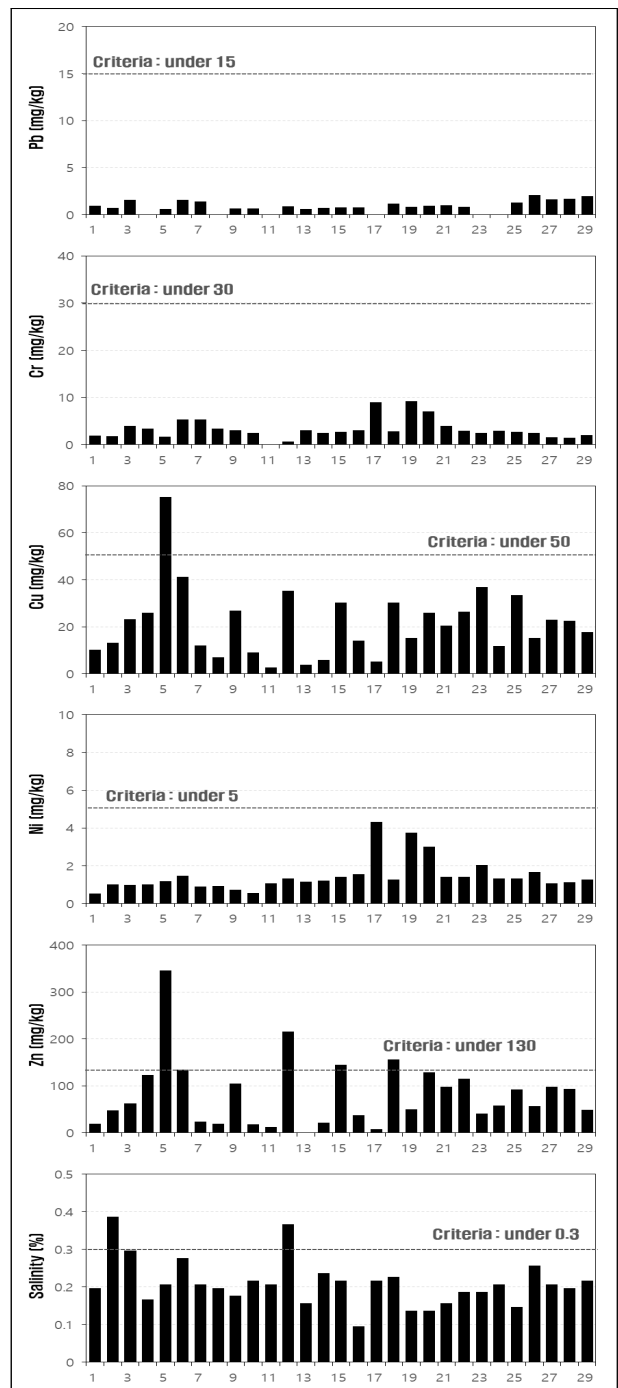


Fig. 4. Analysis result of livestock manure liquefied fertilizer.

부속도가 부속완료료 모두 공정규격을 만족하였고 대장균(O157:H7)과 살모넬라도 모두 공정규격(불검출)을 만족하였다.

가축분뇨 액비 시료중에서 비소는 28개 시료가 공정규격(5 mg/kg 이하)을 만족하였고 1개 시설은 10.12 mg/kg으로 공정규격을 초과하고 있는 것으로 확인되었다. 또한 구리도 1개 시설에서 공정규격(50 mg/kg 이하)을 초과하였는데 74.13 mg/kg로 나타났으며, 아연은 24개 시료가 공정규격(130 mg/kg 이하)을 만족하였고 4개 시료가 139.19~340.73 mg/kg로 분석되어 공정규격을 초과하였다.

3.3 가축분뇨 퇴비·액비의 통계분석 결과

조사대상시설 333개소의 가축분뇨 퇴비·액비의 성분분석 결과를 토대로 통계적 분석을 수행하였으며, 통계분석 항목은 산술평균, 최소값, 최대값, 표준편차, 분산, 중간값과 백분위수(95%ile, 75%ile, 25%ile, 5%ile), 변동계수, 표준오차 및 피어슨상관계수이다.

가축분뇨의 퇴비는 유기물을 포함하여 총 12개 항목에 대하여 통계분석을 실시하였고, 비소, 카드뮴, 수은, 대장균, 살

모넬라 및 부속도 총 6개 항목은 퇴비의 성분분석 결과가 불검출 또는 공정규격에 적합하여 통계분석을 제외하였다.

가축분뇨 퇴비의 통계분석 결과, 유기물의 평균값(범위)은 40.6%(11.8~81.0)이었고, 유해성분인 납, 크롬, 구리, 니켈 및 아연의 평균값(범위)은 각각 12.4 mg/kg(1.5~99.2), 14.5 mg/kg(0.2~193.9), 149.3 mg/kg(12.9~688.0), 8.6 mg/kg(0.6~137.5) 및 597.2 mg/kg(8.6~3,132.0)로 나타났다. 또한, 유기물대질소의 비의 평균값(범위)은 24.5(13.3~46.2)이었고, 염분과 수분 및 염산불용해물의 평균값(범위)은 각각 1.18%(0.28~3.30), 38.8%(2.1~65.4) 및 2.52%(0.96~5.82)로 나타났다. 질소전량과 암모니아태질소의 평균값(범위)은 각각 1.75%(0.38~5.69)와 0.26%(0.02~0.98)이었다.

가축분뇨 퇴비의 시료 분석항목에 대하여 상관도 분석결과, 유해성분인 납과 크롬, 납과 니켈, 아연과 구리는 두변수 사이에 통계적으로 유의한 수준의 양(+)의 상관성이 있는 것으로 나타났다(n=304, p<0.05).

수분과 유기물, 수분과 질소전량은 두변수 사이에 통계적으로 유의한 수준의 음(-)의 상관성이 있는 것으로 나타났다(n=304, p<0.05).

Table 1. Results of the statistical analysis of livestock manure compost.

Category	Organic Matter (%)	Pb (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)
Mean	40.6	12.4	14.5	149.3	8.6
Min	11.8	1.5	0.2	12.9	0.6
Max	81.0	99.2	193.9	688.0	137.5
Standard Deviation	8.9	11.4	20.0	95.4	13.6
Variance	79.7	129.3	397.9	9,063.5	183.3
95%ile	58.6	35.1	52.6	330.7	16.8
75%ile	44.4	14.8	14.6	192.5	8.6
Median	39.3	8.9	8.5	123.7	5.7
25%ile	35.3	5.8	5.2	80.9	4.2
5%ile	30.3	3.7	2.3	46.2	2.7
Coefficient of Variation	0.2	0.9	1.4	0.6	1.6
Standard Error	0.6	0.7	1.2	5.9	0.8
Category	Zn (mg/kg)	Salinity (%)	Water (%)	C/N ratio	Total Nitrogen(%)
Mean	597.2	1.18	38.8	24.5	1.75
Min	8.6	0.28	2.1	13.3	0.38
Max	3,132.0	3.30	65.4	46.2	5.69
Standard Deviation	350.3	0.47	11.5	5.4	0.61
Variance	122,204.1	0.22	131.2	29.5	0.37
95%ile	1,158.7	1.95	53.5	33.3	2.79
75%ile	698.0	1.48	46.5	27.3	2.02
Median	504.6	1.13	40.2	24.2	1.66
25%ile	410.0	0.83	34.6	20.8	1.37
5%ile	273.6	0.51	14.1	16.6	1.00
Coefficient of Variation	0.6	0.40	0.3	0.2	0.35
Standard Error	21.6	0.03	0.7	0.3	0.04

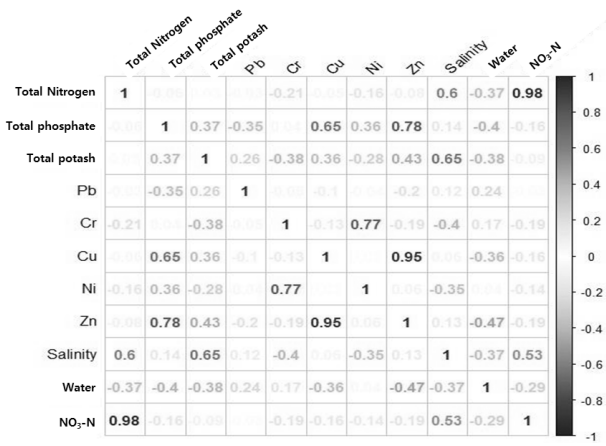


Fig. 5. Results of the correlation analysis of livestock manure compost (N=304).

가축분뇨 액비의 통계분석은 질소전량을 포함하여 총 10 개 항목에 대하여 통계분석을 실시하였고, 비소, 카드뮴, 수은, 납, 대장균, 살모넬라 및 부속도 총 7개 항목은 액비의 성분분석 결과가 불검출 또는 공정규격에 적합하여 통계분

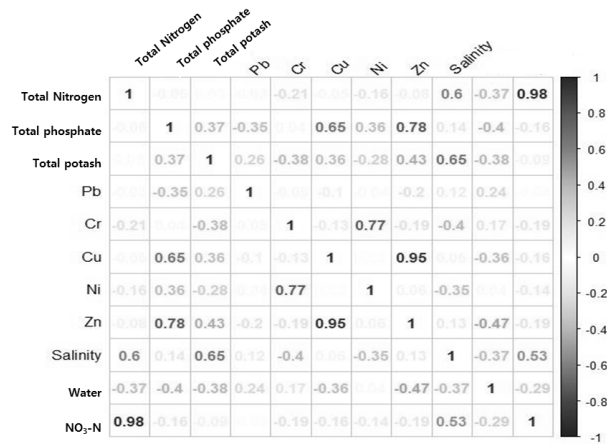


Fig. 6. Results of the correlation analysis of livestock manure liquefied fertilizer (N=29).

석을 제외하였다.

액비의 통계분석 결과, 질소전량, 인산전량, 칼리전량의 평균값(범위)은 각각 0.22%(0.05~1.22), 0.06%(0.01~0.35) 및 0.33%(0.12~0.74)였으며, 유해성분인 크롬, 구리, 니켈 및

Table 2. Results of the statistical analysis of livestock manure liquefied fertilizer.

Category	Total Nitrogen (%)	Total phosphate (%)	Total potash (%)	Cr (mg/kg)
Mean	0.22	0.06	0.33	2.9
Min	0.05	0.01	0.12	0.2
Max	1.22	0.35	0.74	8.7
Standard Deviation	0.21	0.09	0.12	2.1
Variance	0.04	0.01	0.01	4.1
95%ile	0.41	0.31	0.52	7.8
75%ile	0.21	0.05	0.39	3.0
Median	0.18	0.03	0.31	2.4
25%ile	0.12	0.01	0.27	1.8
5%ile	0.05	0.01	0.18	1.0
Coefficient of Variation	0.99	1.53	0.37	0.7
Standard Error	0.04	0.02	0.02	0.4
Category	Ni (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Salinity (%)
Mean	1.3	79.8	20.4	0.20
Min	0.4	3.0	1.6	0.09
Max	4.2	340.7	74.1	0.38
Standard Deviation	0.9	72.9	14.9	0.06
Variance	0.7	5130.8	212.9	0.00
95%ile	3.3	189.9	38.6	0.33
75%ile	1.3	112.5	25.7	0.21
Median	1.1	55.3	19.5	0.20
25%ile	0.9	28.7	10.8	0.17
5%ile	0.5	9.0	3.4	0.13
Coefficient of Variation	0.6	0.9	0.7	0.31
Standard Error	0.2	13.6	2.8	0.01

아연의 평균값(범위)은 각각 2.9 mg/kg(0.2~8.7), 20.4 mg/kg(1.6~74.1), 1.3 mg/kg(0.4~4.2) 및 79.8 mg/kg(3.0~340.7)로 나타났다. 또한 염분과 수분의 평균값(범위)은 각각 0.20%(0.09~0.38) 및 98.0%(93.4~99.3)였고 암모니아태질소의 평균값(범위)은 0.12%(0.01~1.08)로 나타났다.

가축분뇨 액비의 상관도 분석결과, 아연과 구리의 상관성은 두변수 사이에 통계적으로 유의한 수준의 양(+)의 상관성이 있는 것으로 나타났으며($n=29$, $p<0.05$, $r=0.95$), 염분과 수분은 상관성에서 두변수 사이에 통계적으로 유의한 수준의 음(-)의 상관성이 있는 것으로 나타났다($n=29$, $p<0.05$).

3.4 가축분뇨 퇴비·액비 항목별 특성에 대한 개연성 평가 결과

가축분퇴비의 분석항목별 특성에 대한 개연성(초과 및 미만)을 검토한 결과, 유기물은 수분의 비율이 공정규격보다 높으면 공정규격 미만으로 나타날 개연성이 있는 것으로 확인되었다.

8대 중금속(비소, 카드뮴, 수은, 납, 크롬, 구리, 니켈 및 아연)의 특성으로는 8대 중금속이 포함된 미량원소를 성장촉진, 사료효율 개선 등의 목적으로 사료에 첨가한다. 이런 미량원소는 동물체 내에서 전량사용 되지 않고, 일부 분뇨로 배출되어 가축분퇴비의 시비 시 토양 내 중금속 축적 및 지하수 및 지표수를 오염시킨다. 이러한 8대 중금속은 수집된 분뇨의 불균일성, 수분조절제(왕겨, 톱밥 등)의 이용차이, 퇴비단 혼합의 영향으로 공정규격을 초과할 개연성이 있다.

특히, 구리 및 아연은 구리 및 아연 등 광물질이 포함된 폐지의 사료를 사용하므로 돈분에 검출될 개연성 높다. 따라서 가축분퇴비의 구리 및 아연농도는 돈분의 비율을 이용하여 조절 가능하다. 또한, 니켈은 니켈이 포함된 광물질 사료를 가금류의 먹이로 사용하므로 계분에 의해 공정규격을 초과할 개연성이 높다.

대장균과 살모넬라의 특성은 유해미생물(대장균 등)이 부속 퇴비에서는 발견되지 않으나, 미부속 퇴비에서는 검출 가능성 높고, 가축분퇴비에 유해미생물이 존재할 경우, 재배기간 동안 작물에 오염될 가능성 있다. 대장균과 살모넬라의 공정규격을 초과할 개연성은 퇴비의 상태가 미부속일 경우나 부재료의 위생학적 문제점이 있을 수 있다.

유기물대 질소의 비가 높은 가축분퇴비를 시비하였을 경우, 토양 내 미생물이 퇴비의 유기물을 분해하는 과정에서 먹이원으로 질소를 사용하여 토양 내 질소가 부족한 현상이 발생한다. 유기물대 질소의 비는 우분의 비율이 높을 경우, 퇴비에 상대적으로 질소비율이 낮아 공정규격을 초과할 개연성이 있다. 또한, 우분이 다른 가축분 보다 염분이 많은 특성이 있어 염분은 가축분의 종류 및 비율에 따라 공정규격이 초과될 개연성이 있다.

퇴비화 과정에서 미생물을 활성화시키기 위해 수분조절제(톱밥 및 왕겨 등)를 사용하여 수분량을 조절한다. 수분이 높으면 다른 성분(유기물 등)은 떨어지고, 낮으면 다른 성분은 높아짐에 따라 수분조절제 중 일부 규격 미달제품을 사용할 경우와 적게 사용할 경우 그 영향으로 공정규격을 초과할 개

연성이 있다.

퇴비의 부속도가 미부속 상태일 경우, 부속도(콤팩트, 종자 발아법)는 공정규격 미만으로 나타날 개연성 있고, 염산불용해물은 퇴비 내 토사 등이 원료 및 부재료에 섞여 있을 경우에는 공정규격을 초과할 개연성이 있다.

액비 항목별 특성에 대한 개연성 검토 결과, 8대 중금속(비소, 카드뮴, 수은, 납, 크롬, 구리, 니켈 및 아연)의 특성으로는 8대 중금속이 포함된 미량원소를 성장촉진, 사료의 효율 개선 등의 목적으로 사료에 첨가한다. 이런 미량원소는 동물체 내에서 전량사용 되지 않고, 일부 분뇨로 배출되어 액비의 시비 시 토양 내 중금속 축적 및 지하수 및 지표수를 오염시킨다.

이러한 8대 중금속은 액비 내 미량원소의 집적과 시료 채취방법의 오차로 인해 공정규격을 초과할 개연성이 있다.

대장균과 살모넬라의 특성은 유해미생물(대장균 등)이 부속 액비에서는 발견되지 않으나, 미부속 액비에서는 검출 가능성 높고, 액비에 유해미생물이 존재할 경우, 재배기간 동안 작물에 오염될 가능성 있다. 액비의 상태가 미부속일 경우 대장균과 살모넬라의 공정규격을 초과할 개연성이 있다.

수분이 높으면 다른 성분은 떨어지고, 낮으면 다른 성분은 높아짐에 따라 액비교반조 및 저장조에서 수분 증발 등의 영향으로 공정규격 미만으로 나타날 개연성이 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 333개소의 가축분뇨 재활용 시설을 대상으로 현재 운영중인 재활용 시설의 인력과 장비, 가축분뇨 퇴비·액비의 생산량, 퇴비·액비의 시료 분석(질소, 인, 칼륨 및 중금속 함량 등) 등 현장조사 결과를 토대로 가축분뇨 퇴비·액비를 생산 및 판매를 하고 있는 재활용 시설의 실태를 파악하고 퇴비·액비의 분석결과를 토대로 하여 가축분뇨 퇴비·액비의 공정규격을 초과한 물질에 대한 개연성을 검토하고자 하였다.

가축분뇨 퇴비·액비를 생산할 때 발생하는 비소, 카드뮴, 수은, 납, 크롬, 구리, 니켈, 아연 등의 발생 요인을 분석한 결과, 중금속이 포함된 미량원소를 가축의 성장 촉진, 사료의 효율성 개선 등의 목적으로 가축의 사료에 첨가하는 것으로 현장조사에서 확인되었다. 또한 미량의 중금속은 가축분뇨의 수집 등 배출경로에서 가축분뇨의 불균일성, 수분조절제(왕겨, 톱밥 등)의 사용의 적정성 여부, 퇴비사에서의 혼합의 영향으로 중금속 등 비료로서의 가치가 떨어지고 비료 공정규격을 초과할 개연성이 있는 것으로 확인되었다. 현장조사 결과, 대부분의 폐지사육 농가에서는 구리 및 아연 등 광물질이 포함된 폐지의 사료를 사용하고 있는 것으로 확인되어 폐지의 가축분뇨에 미량의 중금속이 검출될 개연성이 높을 것으로 판단되며, 니켈이 포함된 광물질 사료를 가금류의 먹이로 사용하는 것으로 조사되어 가축분뇨의 혼합 시 계분에 의해 공정규격을 초과할 개연성이 높은 것으로 판단된다. 이러한 미량원소는 가축의 체내에서 전량 사용 되지 않고, 일부의 중금속이 가축분뇨로 배출되어 가축분뇨 퇴비·액비

를 살포하는 토양에 중금속 축적 등의 영향을 주고 강우시 퇴비·액비의 토양 침투로 인해 지하수 등의 수질오염의 원인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

가축분뇨는 가축의 종류와 연령 및 체중, 사료의 종류와 양, 급수량에 따라 크게 변할 뿐 아니라 같은 축종 내에서도 사육조건 및 가축분뇨처리 이용 방식에 따라 많은 차이가 발생한다. 가축분뇨는 자원화에 있어서 긍정적인 측면에도 불구하고 대부분의 경종농가가 가축분뇨 퇴·액비의 사용을 기피하는 가장 큰 이유는 품질이 균일하지 못하고, 미부숙된 퇴비와 액비의 유통과 이로 인한 악취문제 때문인 것으로 조사되고 있다. 따라서 지속가능한 농축산업의 발전을 위해서는 가축분뇨 액비의 품질인증기준 개발이 시급하며, 국내 여건에 적합한 제도의 개선이 필요하다.

현재 가축분뇨법의 퇴·액비 기준과 비료관리법의 가축분 퇴·액비 기준이 비료공정규격으로 이원화되어 있다. 이에 대해서 제주도에서는 가축분뇨관리법의 퇴·액비 기준을 비료관리법의 비료공정규격으로 일원화 되도록 법 개정을 요구하기도 하였다. 특히 비료관리법의 비료공정규격은 가축분뇨 이외의 부산물 50%를 섞어 제조하도록 규정되어 있으므로 구리, 아연을 제외한 중금속 기준을 갖추고 있으나 환경적인 측면을 고려하였을 때 가축분뇨법에서 퇴비·액비에 대한 규제를 엄격하게 할 필요가 있다고 사료된다. 또한 가축분뇨 전자인계관리시스템에 퇴비·액비의 부숙도 및 성분분석 결과를 등록하도록 가축분뇨법을 개정하여 가축분뇨를 활용한 적정 수준의 품질기준을 만족하는 가축분뇨 퇴비·액비를 생산하여 유통할 수 있는 체계를 마련해야 할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-SP2019-274).

References

- Ahn, H. K., Choi, H. L., Jung, W. C., Kim, K. Y., Kim, J. K., Park, I. H., and Jung, Y. C. (2001). Impact of livestock waste on the water quality of Paldang reservoir, *Journal of Animal Science and Technology*, 43(4), 569-586. [Korean Literature]
- Alonso, A. and Camargo, J. A. (2011). The freshwater planarian *Polycelis felina* as a sensitive species to assess the long-term toxicity of ammonia, *Chemosphere*, 84(5), 533-537.
- Dupas, R., Delmas, M., Dorioz, J., Garnier, J., Moatar, F., and Gascuel-Oudoux, C. (2015). Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk, *Ecological Indicators*, 48, 396-407.
- Jang, N., Kim, B., Im, S., and Kim, T. (2012). A study on evaluation of target region for the agricultural non-point sources management, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 34(1), 23-31. [Korean Literature]
- Jeon S. J., Kim, S. R., Kim, D. G., Rho, K. S., Choi, D. Y., and Lee, M. G. (2012). Studies on the main level-grading factors for establishment of LFQC (Liquid Fertilizer Quality Certification) system of livestock manure in Korea, *Journal of Animal Environmental Science*, 18(2), 111-122. [Korean Literature]
- Kim, C. G., Kim, T. Y., and Shin, Y. K. (2005). *Implementation program for introducing regional-based maximum nutrients loading system*, Korea Rural Economic Institute Seoul. [Korean Literature]
- Kim, D. W., Jang, M. J., and Han, I. S. (2014). Determination of focused control pollutant source by analysis of pollutant delivery characteristics in unit watershed upper Paldang lake, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 36(5), 367-377. [Korean Literature]
- Kim, M. C., Song, S. T., and Hwang, K. J. (2004). Evaluation of slurry, urine and fermented liquid manure at pig farms in the Jeju area regarding chemical composition and pollution level, *Journal of Animal Science and Technology*, 46(3), 469-478. [Korean Literature]
- Kim, M. S., Kim, S. C., Yun S. G., Park, S. J., and Lee, C. H. (2018). Quality Characteristics of Commercial Organic Fertilizers Circulated, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 26(1), 21-28. [Korean Literature]
- Kim, P. J., Lee, Y. B., Lee, Y., Yun, H. B., and Lee, K. D. (2008). Evaluation of livestock manure utilization rates as agricultural purpose in developed OECD countries by using nutrient balance, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 27(4), 337-342. [Korean Literature]
- Korea Environment Institute (KEI). (2019). *A study on sustainable livestock manure management*, Korea Environment Institute, 1-3. [Korean Literature]
- Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs. (2007). *Development of non-point source pollution control and management technologies for the Saemangeum watershed Sejong*, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Measure plan for managing livestock manure and improving water quality, Sejong*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2020). *Statistics of livestock manure treatment*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2013). *Study based on basic unit of livestock pollution source for extended application of target pollutant of total load management, Incheon*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Ryu, H. D., Park, B. K., Chung, E. G., Ahn, K. H., Choi, W. S., Kim, Y. S., and Rhew, D. H. (2015). Determination of prior areas for livestock excreta pollution survey, *Journal of Environmental Science International*, 24(8), 1085-1099. [Korean Literature]