

농경지 양분관리를 위한 양분수지 지표와 양분부하 지표간의 비교

이준형, 윤영만*

한경대학교 식물생명환경과학과/바이오가스연구센터

Comparison of nutrient balance and nutrient loading index for cultivated land nutrient management

Jun-Hyung Lee and Young-Man Yoon*

Department of Plant Life & Environmental Science/Biogas Research Center, Hankyong National University, Anseong 17579, Republic of Korea

***Corresponding author**

Young-Man Yoon

Tel. 031-670-5086

E-mail. yyman@hknu.ac.kr

Received: 5 November 2019

Revised: 14 November 2019

Revision accepted: 14 November 2019

Abstract: Recently, concerns regarding the environmental impact due to nutrient input in croplands have increased. Therefore, the government is promoting the introduction of a nutrient management system in croplands to solve the problem of excessive nutrient input. This study was carried out to establish nutrient indicators in regional croplands to facilitate the introduction of the national nutrient management system in Korea. The nutrient load and balance indicators for nitrogen and phosphorus were analyzed for nine provinces (Gang-won, Gyeong-gi, Chung-buk, Chung-nam, Jeon-buk, Jeon-nam, Gyeong-buk, Gyeong-nam, and Jeju). In the correlation analysis between the nutrient load and nutrient balance, the correlation coefficient (r) for nitrogen was 0.2504, which was not statistically significant at the 5% significance level. However, the correlation coefficient for phosphorus was 0.7375, which was statistically significant at the 5% significance level. In the nutrient management index, phosphorus showed mutual compatibility between the nutrient load and the nutrient balance indicators, but nitrogen showed no mutual compatibility between the nutrient load and the nutrient balance indicators. Therefore, utilization of the nutrient balance indicator, reflecting the characteristics of the agricultural environment, was more reasonable as a nutrient management index for regional nutrient management.

Keywords: eco-friendly agriculture, nutrient balance index, nutrient load index, nitrogen and phosphorus, nutrient management

서 론

2015년 기준 우리나라 국가 양분수지는 OECD 국가 중 질소 수지 1위(221.9 kg-N ha⁻¹), 인 수지 2위(46.3 kg-P ha⁻¹)로 보고(OECD.stat 2019)되고 있어, 농경지 투입양

분으로 인한 환경영향에 대한 우려와 함께 하천 등으로 유출되는 비점오염원의 관리가 요구되고 있다. 따라서 정부는 농경지의 양분 과잉 투입으로 인한 환경 문제를 해결하기 위해 지역단위로 농경지 양분부하 현황을 산출하고, 농경지의 양분 수준의 관리목표를 설정하여 관리하는

양분관리 제도를 단계적으로 도입하고자 하고 있다(ME 2015).

지역단위 양분관리제도는 과학적 토대 위에서 지역별 농경지의 양분투입과 처리를 종합적으로 파악하여 지역의 환경용량 범위에서 수용할 수 있는 양분을 총량 수준으로 관리하기 위한 제도이다. 이러한 양분관리제도는 지속가능한 농축산업 시스템 구축을 위한 유력한 정책 프로그램으로 평가되고 있다(KREI 2015). 농식품부와 환경부는 2004년 「가축분뇨 관리·이용 종합대책」(ME·MAFRA 2004)을 수립하면서 축산 밀집지역에서 가축분뇨로 인한 환경오염을 저감하기 위한 방법으로 양분관리제도 도입을 시사한 바 있으며, 이후 농촌경제연구원은 「지역단위 양분총량제 도입 세부시행방안 연구」(KREI 2005)에서 과잉양분을 효과적으로 관리하기 위한 조치로서 지역별 양분수지의 진단을 통해 농축산 부문의 생산 활동과 투입자재를 조절함으로써 양분수지를 균형 수준에 도달시키는 것을 정책목표로 양분관리제도 도입방안을 연구한 바 있다. 특히 KREI(2005)는 지역 양분관리를 위한 지표로서 농경지 양분요구량 대비 실제 양분투입량의 비율로 나타내는 양분초과율 지표를 제시하였다. 또한 지역별 질소 부하정도에 따라 전국평균 양분요구량 대비 지역단위의 양분초과량이 40 kg-N ha^{-1} (양분초과율 30%) 미만인 지역(양분관리우수지역), $40 \sim 120 \text{ kg-N ha}^{-1}$ 인 지역(양분관리유도지역), 양분초과량이 120 kg-N ha^{-1} (양분초과율 100%) 이상인 지역(양분특별관리지역), 양분초과량 $120 \sim 180 \text{ kg-N ha}^{-1}$ 까지의 지역(양분특별관리 I지역), 180 kg-N ha^{-1} 이상인 지역(양분특별관리 II지역)으로 분류하여 관리하는 방안을 제시한 바 있다. 이후 2013년 농식품부는 중장기 가축분뇨 자원화 대책(MAFRA 2013)에서 가축분뇨로 인한 농업환경 오염 경감을 위하여 양분관리제도의 단계적 도입을 명시하였다. 농촌경제연구원은 후속 연구인 「양분총량제 도입방안 연구」(KREI 2015)에서 기존 양분초과율 지표를 그대로 활용하여 관리대상지역을 질소성분 기준 양분초과율 50% 이하 지역(양분관리우수지역), 양분초과율 50~100% 지역(양분관리 관심지역), 양분초과율 100~150% 지역(양분관리 유도지역), 양분초과율 150% 초과 지역(양분특별관리 지역 I, II)으로 구분하여 관리하는 방안을 제시하였다.

기존 양분관리제도 도입방안 연구에서 관리 지표로 제

시한 바 있는 양분초과율 지표는 농경지 비료성분 요구량(작물별 비료성분의 시비기준)에 대한 투입 비료성분량의 비율로서 지역별 농경지 양분초과량을 나타내는 양분부하(Nutrient load) 지표이다. 양분부하 지표는 분석모델이 단순하여 단위 지역에서의 비료성분의 부하 관리에 용이한 특성이 있으나 지역별 농업환경 및 농작물의 재배 특성에 따른 작물의 양분 이용 효율 변동 영향을 반영하지 못하고, 농업 비점오염의 수계 유출과의 상관관계를 설명하지 못하는 단점이 지적되고 있다(ME·MAFRA 2016). 특히, 농경지로 유입된 비료성분은 비점오염원으로 작용하며 다양한 경로를 거쳐 수계로 유입된다(Kim *et al.* 2017a; Chen *et al.* 2018). 비점오염원으로서의 양분유출 특성은 비료성분, 농경지 토양 특성, 재배작물, 작물의 양분이용 효율, 농업활동, 지역의 기후 특성 등에 의해 큰 영향을 받는다(Choi *et al.* 2016). 그러므로 농경지 양분요구량에 대한 양분투입량의 비율을 나타내는 양분부하 지표는 단순히 양분부하도만을 나타내며, 농경지 내에서의 양분 순환 및 이용특성은 설명할 수 없어 실질적인 수계유출에 대한 잠재량을 평가하는 데는 한계가 있다. 따라서 최근에는 양분관리 제도 도입의 관리지표로서 농경지 투입양분과 유출양분의 수지 산출을 통해 잠재적인 수계 유출량을 추정하는 양분수지 지표의 도입이 검토되고 있다(ME 2016). 양분수지 지표는 OECD 국가의 농업환경지표로 활용되고 있으며(OECD 2013), 농경지 투입 양분과 작물 생산을 통해 농경지에서 반출되는 양분의 수지를 나타내는 지표로서 지역별 다양한 농업 환경 특성을 반영할 수 있는 장점이 있다. 특히 양분수지 지표는 최적의 영농활동을 통해 농업생산을 증대시키거나, 농산부산물의 연료 이용 등을 통해 농경지 내에서의 양분 순환을 저감시키는 경우 양분수지를 개선시킬 수 있는 특징이 있어 농경지 양분의 관리 지표로 활용도가 높다. 그러나 아직까지 양분수지 지표를 활용한 농경지 양분관리 연구는 그 사례가 미미한 상황으로 합리적인 양분관리제도의 도입을 위해서는 양분부하 지표보다는 지역의 농업환경 특성과 양분의 순환구조를 더 잘 설명하는 양분수지 지표의 도입이 필요한 상황이다. 따라서 본 연구는 국내 양분관리 제도 도입을 위한 합리적인 양분관리 지표를 도출하기 위하여 국내 도 단위 양분부하와 양분수지 지표를 산출하였으며, 양분부하 및 양분수지 지표의 특성을 비교·검토하였다.

재료 및 방법

1. 양분수지와 양분부하 분석 모델

본 연구에서 농경지 양분수지(질소, 인 수치)와 양분부하(질소, 인 부하)의 분석을 위한 분석 모델은 Fig. 1과 같다. 양분수지 분석은 농경지(토양)를 경계조건으로 설정하였으며(Leip *et al.* 2011), 양분수지는 농경지로 유입되는 양분과 유출되는 양분의 수치(Eq. 1)를 의미한다. 농경지 양분수지의 분석에서 유입양분은 농업생산을 위해 투입하는 무기질 비료(화학비료), 가축분뇨에서 기인하는 부속 유기질 비료(가축분뇨 퇴·액비), 유기질 비료(유박비료 등)를 항목으로 두었으며, 직접적인 비료성분의 투입활동 이외에 경작지 내에서의 생물학적 질소고정, 종자투입, 녹비작물, 대기강하물, 관개용수에서 기인하는 양분투입 항목을 모델에 반영하였다. 농경지 유출양분 분석은 농식품 및 사료 등의 작물생산으로 인한 양분의 유출과 지하침출, 유거에 의한 수계유출, 휘발, 탈질(N₂O)에 의한 대기 유출 항목을 설정하였다. 양분수지의 분석을 통해 산출한 양분수지 지표 값은 농경지 투입양분으로부터 수계로 유출되는 양분의 잠재량으로 하였으며, Eq. 2와 같이 산정하였다. 또한 양분부하는 농경지에서 작물의 재배를 위해 요구되는 양분의 수용용량(Carrying capacity)에 대한 비료성분의 투입량의 비율을 나타내는 지표로서 Eq. 3과 같이

산정하였다.

$$\text{양분수지} : \text{양분유입(A)} = \text{양분유출(D)} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{양분수지 지표(b)} = \frac{\text{양분유입(A)}}{\text{작물생산 양분유출(a)} - \text{대기유출(c)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{양분부하} = \frac{\text{농경지 양분유입량(B)}}{\text{농경지 양분요구량(C)}} \quad (\text{Eq. 3})$$

2. 양분수지 분석

양분수지 및 양분부하의 분석은 행정구역상 도 단위를 기준으로 실시하였으며, 질소와 인성분에 대하여 유입 및 유출 항목별로 산출하였다.

1) 무기질 비료(화학비료)

화학비료에서 기인하는 질소와 인성분의 유입량은 무기질 비료의 품목별 공급량에 품목별 비료성분량을 곱하여 Eqs. 4, 5와 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{화학비료 질소 공급량(kg yr}^{-1}\text{)} \\ & = \sum_{i=1}^n \text{화학비료품목별(i)공급량(kg yr}^{-1}\text{)} \\ & \quad \times \text{품목별(i) 질소함량(\%)} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4})$$

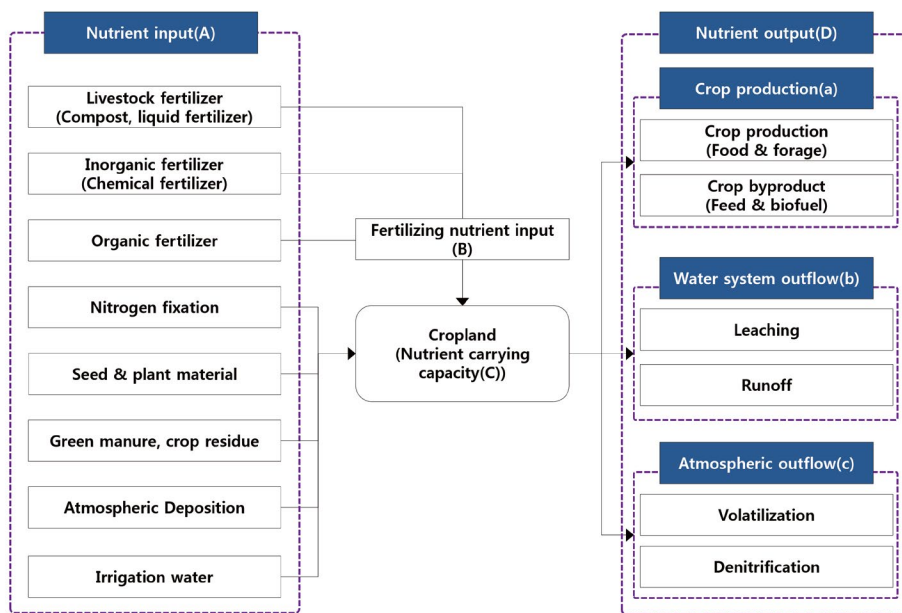


Fig. 1. Model for the nutrient balance analysis of cropland.

$$\begin{aligned} & \text{화학비료 인 공급량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{화학비료품목별}(i)\text{공급량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ & \quad \times \text{품목별}(i)\text{인함량}(\%) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5})$$

2) 가축분뇨 퇴·액비

가축분뇨에서 유래하는 퇴비와 액비로 인한 질소와 인성분의 유입량은 축종별 가축 사육두수에 축종별 발생원 단위를 곱하고, 가축분뇨 비료성분 발생원단위를 곱하여 가축분뇨 유래 비료성분 발생량을 산출한 후, 가축분뇨 자원화 과정에서의 양분 손실 계수를 고려하여 Eq. 6~15와 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{가축분뇨 질소성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \text{가축분 질소성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ & \quad + \text{가축노 질소성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축분 질소성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{축종별}(i)\text{사육두수} \times \text{축종별}(i)\text{발생원단위}(\text{분}) \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{분의 질소함량}(\%) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축노 질소성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{축종별}(i)\text{사육두수} \times \text{축종별}(i)\text{발생원단위}(\text{노}) \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{노의 질소함량}(\%) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축분뇨 인성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \text{가축분 인성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ & \quad + \text{가축노 인성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축분 인성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{축종별}(i)\text{사육두수} \times \text{축종별}(i)\text{발생원단위}(\text{분}) \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{분의 인함량}(\%) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축노 인성분 발생량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{축종별}(i)\text{사육두수} \times \text{축종별}(i)\text{발생원단위}(\text{노}) \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{노의 인함량}(\%) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축분뇨 정화처리시설 양분(질소, 인) 삭감량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{축종별}(i)\text{시설유입량}(\text{Mg day}^{-1}) \\ & \quad \times \text{시설가동율}(\%) \times \text{축종별}(i)\text{가축분뇨 질소, 인함량}(\%) \\ & \quad \times 365(\text{day}) \times 1,000 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축분뇨 액비 질소성분 유입량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{축종별}(i)\text{질소성분 발생량} \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{액비화 처리율}(\%) \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{액비화 질소부하 조정계수} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축분뇨 퇴비 인성분 유입량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{축종별}(i)\text{인성분 발생량} \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{퇴비화 처리율}(\%) \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{퇴비화 인부하 조정계수} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\begin{aligned} & \text{가축분뇨 액비 인성분 유입량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \text{축종별}(i)\text{인성분 발생량} \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{액비화 처리율}(\%) \\ & \quad \times \text{축종별}(i)\text{액비화 인부하 조정계수} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 15})$$

3) 유기질 비료

유기질 비료에서 유래하는 질소와 인성분의 유입량은 Eq. 16과 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{유기질비료 양분(질소, 인) 유입량}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \text{도단위 유기질비료 공급량}(\text{Mg yr}^{-1}) \\ & \quad \times \text{유기질비료 평균양분함량}(\%) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 16})$$

4) 생물학적 질소고정

생물학적 질소고정은 콩과작물에 의한 질소고정을 평가하며, 작물생산량과 지상부 바이오매스를 고려하고 질소고정단위를 곱하여 Eq. 17과 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{질소고정}(\text{kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \{ \text{콩과작물별}(i)\text{생산량} \times (1 + \text{잔사/곡실비}) \\ & \quad \times \text{지상부 건물함량}(\%) \\ & \quad \times \text{질소고정량단위}(\text{kg-N kg}^{-1}\text{-DM}) \} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 17})$$

5) 종자 및 종묘

종자 및 종묘에 의한 양분유입은 작물재배면적에 작물별 단위면적당 파종량을 곱하여 작물별(곡류, 서류) 파종량을 구하고, 종자 또는 종묘에서의 비료성분 함량을 곱하여 Eq. 18, 19와 같이 산출하였다.

$$\text{종자 질소유입}(\text{kg yr}^{-1})$$

$$= \sum_{j=1}^n \{ \text{종자별 (i) 파종량 (Mg yr}^{-1}) \times \text{종자별 (i) 질소함량 (\%)} \times 1,000 \} \quad (\text{Eq. 18})$$

종자 인유입 (kg yr⁻¹)

$$= \sum_{j=1}^n \{ \text{종자별 (i) 파종량 (Mg yr}^{-1}) \times \text{종자별 (i) 인함량 (\%)} \times 1,000 \} \quad (\text{Eq. 19})$$

6) 작물잔사 유입

잔물잔사는 토양으로 투입한 양분을 흡수 이용하여 생산되거나 토양으로 환원하는 경우 토양 환원된 작물잔사는 미생물에 의해 분해되어 양분이 무기화된다. 따라서 농경지를 다년간 연속하여 경작하는 경우 토양으로 환원되는 잔물잔사에서 기인하는 양분은 토양에 지속적으로 잔존하는 것으로 간주하였으며, 작물잔사의 유입은 양분수지상 균형을 이루는 것으로 간주하고 별도의 잔사유입으로 인한 양분유입을 고려하지 않았다.

7) 대기강하물

대기강하물은 습성강하물과 건성강하물로 구분하며, 습성강하물은 농업지역에서 휘발한 암모니아(NH₃)가 강우에 용해되어 암모늄 이온(NH₄⁺)으로 강우와 함께 강하하거나, 인근 소각시설에서 발생한 질소산화물이 질산이온(NO₃⁻)의 형태로 유입된다. 건성강하물은 입자상 오염물질과 함께 농경지로 유입되며 암모니아(NH₃) 및 질소산화물을 포함하고 있다. 따라서 대기강하물에 의한 양분유입은 Eq. 20과 같이 작물재배면적에 대기강하물에 의한 질소강하계수를 곱하여 산출하였다.

$$\begin{aligned} &\text{대기강하물 질소유입 (kg yr}^{-1}) \\ &= \text{작물재배면적 (ha)} \times \text{질소강하계수 (kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 20})$$

8) 관개수 유입

본 연구에서는 관개수를 통한 양분유입은 논에서의 벼 재배 만을 고려하였으며, 농어촌공사에서 운영하는 농업용수종합정보시스템의 자료를 활용하여 Eq. 21, 22와 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} &\text{관개용수질소유입 - 논 (kg yr}^{-1}) \\ &= \text{작물재배면적 (ha)} \times 0.3 \text{m} \times 4 \\ &\quad \times \text{관개수질소농도 (mg L}^{-1}) \times \frac{1}{1,000} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\begin{aligned} &\text{관개용수인유입 - 논 (kg yr}^{-1}) \\ &= \text{작물재배면적 (ha)} \times 0.3 \text{m} \times 4 \\ &\quad \times \text{관개수인농도 (mg L}^{-1}) \times \frac{1}{1,000} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 22})$$

9) 작물생산 유출

작물 수확으로 인한 양분유출은 단위지역의 작물별 수확량에 작물별 비료성분 함량을 곱하여 Eq. 23, 24와 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} &\text{작물생산질소유출 (kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \{ \text{작물별 (i) 생산량 (Mg yr}^{-1}) \times \text{작물별 질소함량 (\%)} \} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$\begin{aligned} &\text{작물생산인유출 (kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \{ \text{작물별 (i) 생산량 (Mg yr}^{-1}) \times \text{작물별 인함량 (\%)} \} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 24})$$

10) 작물부산물 유출

농업 활동에서 발생한 작물부산물은 농경지 외로 유출시켜 소각 처리 또는 연료로 이용하며, 벼 재배에서 발생하는 볏짚 및 왕겨는 가축사료 또는 사육사의 깔짚으로 활용되고 있다. 따라서 작물부산물 중 농경지 외로 이동하여 소각처리 및 재활용되는 양을 산정하고, 작물별 양분 함량을 곱하여 Eq. 25, 26과 같이 산출하였다.

$$\begin{aligned} &\text{작물부산물 질소유출 (kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \{ \text{작물별 (i) 생산량 (Mg yr}^{-1}) \times \text{잔사발생계수 (Bi)} \\ &\quad \times \text{잔사 질소함량 (\%)} \} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$\begin{aligned} &\text{작물부산물 인유출 (kg yr}^{-1}) \\ &= \sum_{i=1}^n \{ \text{작물별 (i) 생산량 (Mg yr}^{-1}) \times \text{잔사발생계수 (Bi)} \\ &\quad \times \text{잔사 인함량 (\%)} \} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 26})$$

11) 생물학적 탈질 유출

화학비료 시용에 따른 N₂O 직접배출계수는 논 배출계수(EF_{1FR})와 밭 작물종별 배출계수(EF_{1i})로 구분하여 적용하였으며, 논 배출계수는 2006 IPCC GL의 기본값 0.003 kg N₂O-N kg⁻¹-N을 적용하였고, 밭 배출계수는 2014년 국가고유 배출계수로 승인받은 작물종별(고추, 콩, 감자, 봄배추, 가을배추) 배출계수를 적용하고 그 외의 작물에는 밭작물 통합계수 0.00596 kg N₂O-N kg⁻¹-N을 적용하였다.

질소고정 작물(콩)과 작물잔사의 토양 환원에 따른 N_2O 직접배출계수도 작물종별로 각각 N_2O 직접배출계수를 적용하였으며, 농경지 토양에 투입되는 가축분뇨에서 발생하는 N_2O 배출량 산정을 위해 가축분뇨처리 부문에서 적용한 축종별 분뇨 질소량에 가축분뇨의 농경지 투입에 따른 N_2O 기본 배출계수로 1996 IPCC GL의 기본값(EF_{11})인 $0.0125 \text{ kg } N_2O\text{-N kg}^{-1}\text{-N}$ 을 적용하여 산출하였다.

$$N_2O_D = \sum_i^N \{[(F_{SN} + F_{ON})_i \times EF_{11} + (F_{CR} + F_{SOM}) \times EF_{11}] + N_2O - N_{OS} + N_{PRP}\} \times 44/28 \quad (\text{Eq. 27})$$

N_2O_D : 농경지토양 N_2O 직접배출량 [$\text{kg } N_2O\text{-N yr}^{-1}$]

EF_{11} : 작물별 N_2O 직접배출계수 [$\text{kg } N_2O\text{-N kg}^{-1}\text{-N}$ 투입량]

EF_1 : 농경지토양 질소 투입에 따른 N_2O 배출계수 [$\text{kg } N_2O\text{-N kg}^{-1}\text{-N}$ 투입량]

F_{SN} : 연간 화학비료로 투입되는 질소량 (NH_3 , NO_x 대기 휘산량 제외) [kg-N yr^{-1}]

F_{ON} : 연간 유기질소로 투입되는 질소량 [kg-N yr^{-1}]

F_{CR} : 연간 작물 잔사로서 농경지에 재투입되는 질소량 [kg-N yr^{-1}]

F_{SOM} : 농경지 토지이용 및 관리 변화에 따른 토양탄소 손실로 인해 광물화된 질소량 [kg-N yr^{-1}]

$N_2O\text{-}N_{OS}$: 연간 관리되는 유기토양의 $N_2O\text{-}N$ 직접배출량 [$\text{kg } N_2O\text{-N yr}^{-1}$]

$N_2O\text{-}N_{PRP}$: 연간 방목지에 가축분뇨로 투입되는 $N_2O\text{-}N$ 직접배출량 [$\text{kg } N_2O\text{-N yr}^{-1}$]

44/28: N 배출량 ($\text{kg } N_2O\text{-N yr}^{-1}$)의 N_2O 환산계수

$$\sum_i^n (FS_i \times FV_i) + \sum_j^n (A_j \times N_2OD_j) \quad (\text{Eq. 28})$$

식(28)에서 FS_i 는 비료종류별(i) 공급량, FV_i 는 비료종류별(i) 암모니아성 질소 휘발율(%), A_j 는 작물별(j) 재배면적, N_2OD_j : 작물별(j) 아산화질소($N_2O\text{-}N$) 탈질량(kg-N yr^{-1})이다.

3. 양분부하 분석

양분부하는 작물별표준시비량을 기준으로 하는 농경지 양분 수용용량 대비 양분 투입량으로 정의하였다. 양분부하도 산출을 위한 투입양분은 화학비료공급량, 가축분뇨 퇴액비, 유기질비료에서 기인하는 질소, 인으로 한정하였

으며, 농경지 양분 수용용량은 작물별 표준시비량을 기준으로 작물별 재배면적에 작물별 시비기준을 곱하여 산출하였다. 또한 연간 2작기 이상을 가지는 시설원에 하우스의 집약적 생산체계를 반영하여 시설원예작물 양분수요 조정계수를 산정하여 반영하여 양분부하율을 Eq. 29에서 Eq. 34와 같이 산출하였다.

$$\text{질소부하도} = \text{노지작물 질소부하도} + \text{시설작물 질소부하도} \quad (\text{Eq. 29})$$

질소부하도(노지)

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \text{질소투입원별 (i) 농경지 질소투입량 (kg yr}^{-1})}{\sum_{j=1}^n (\text{노지작물별 (j) 재배면적 (ha)} \times \text{작물별 표준질소시비량 (kg ha}^{-1})} \quad (\text{Eq. 30})$$

질소부하도(시설)

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \text{질소투입원별 (i) 농경지 질소투입량 (kg yr}^{-1})}{\sum_{j=1}^n \text{시설작물별 (j) 재배면적 (ha)} \times \text{작물별 표준 질소시비량 (kg ha}^{-1}) \times \text{시설채소작물비료투입계수}} \quad (\text{Eq. 31})$$

인부하도 = 노지작물 인부하도 + 시설작물 인부하도

$$(\text{Eq. 32})$$

인부하도(노지)

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \text{인투입원별 (i) 농경지 인투입량 (kg yr}^{-1})}{\sum_{j=1}^n (\text{노지작물별 (j) 재배면적 (ha)} \times \text{작물별 표준 인시비량 (kg ha}^{-1})} \quad (\text{Eq. 33})$$

인부하도(시설)

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \text{인투입원별 (i) 농경지 인투입량 (kg yr}^{-1})}{\sum_{j=1}^n \text{시설작물별 (j) 재배면적 (ha)} \times \text{작물별 표준 인시비량 (kg ha}^{-1}) \times \text{시설채소작물비료투입계수}} \quad (\text{Eq. 34})$$

4. 통계자료

지역단위 양분수지와 양분부하 분석을 위한 통계자료는 2017년도를 기준년도로 하였으며, 무기질비료는 농림축산식품통계연보(MAFRA 2018a)를 사용하였으며, 가축사육두수는 가축동향조사(MAFRA 2018b), 유기질비료

는 비료사업통계(NACF 2017)를 사용하였다. 기타 양분의 유입 유출 항목의 산출을 위한 통계자료 및 조정계수는 ME·MAFRA (2016)의 보고서 자료에 근거하여 산출하였다.

5. 자료분석

도 단위 양분수지와 양분부하의 상관관계 분석은 SigmaPlot (Window version 10.0, Systat Software Inc., San Jose, CA, USA)을 이용하여 상관관계분석(Gomez and Gomez 1984)을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 농경지 양분수지

도 단위로 분석한 질소 양분의 유입현황은 Table 1과 같다. 도 단위 질소 양분수지에서 가축분뇨에서 기인하는 농

경지 질소 유입량은 경기도가 27.2 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 다음으로 충청남도 22.8 Ggyr⁻¹, 경상북도 19.8 Ggyr⁻¹, 전라남도 18.4 Ggyr⁻¹ 순으로 나타났으며, 무기질비료(화학비료) 유래 질소 유입량은 전라남도가 34.5 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 충청남도 23.3 Ggyr⁻¹, 전라북도 22.4 Ggyr⁻¹으로 나타났다. 또한 유기질 비료 유래 질소 유입량은 경상북도 9.3 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 전라남도 5.7 Ggyr⁻¹, 충청북도 3.2 Ggyr⁻¹ 순으로 나타났다. 따라서 농경지 양분유입은 주로 가축분뇨 유래 부속유기질비료와 무기질비료에서 기인하는 것으로 나타났다. 또한 농경지 질소 유입에서 가축분뇨가 차지하는 비중은 경기도가 질소 유입의 54.0%를 차지하여 가축분뇨로 인한 질소 유입 비중이 가장 높은 것으로 나타났다. 양분수지 분석에서 가축분뇨로 인한 질소유입은 지역 내 가축사육두수를 기초로 산출하고 있어 가축분뇨에서 기인하는 양분유입 비중은 지역의 가축사육두수와 비례한다. 그러나 가축분뇨 퇴비의 경우 지역 간 유통이 활발히 이루어지고 있어 가축분뇨 퇴비의 생산지와 소비지가 일치하지 않는 경우가 있어 가축

Table 1. Nitrogen input in croplands

Province	Livestock manure kg-N yr ⁻¹ (%)	Inorganic fertilizer kg-N yr ⁻¹ (%)	Organic fertilizer kg-N yr ⁻¹ (%)	Nitrogen fixation kg-N yr ⁻¹ (%)	Seed and planting materials kg-N yr ⁻¹ (%)	Atmospheric Deposition kg-N yr ⁻¹ (%)	Irrigation water kg-N yr ⁻¹ (%)	Sum kg-N yr ⁻¹ (%)
Gang-won	7,116,931 (27.1)	13,169,000 (50.2)	3,122,484 (11.9)	130,772 (0.5)	152,485 (0.6)	2,328,731 (8.9)	202,942 (0.8)	26,223,344 (100.0)
Gyeong-gi	27,183,287 (54.0)	15,558,000 (30.9)	2,558,805 (5.1)	131,345 (0.3)	287,547 (0.6)	3,590,872 (7.1)	1,076,103 (2.1)	50,385,958 (100.0)
Chung-buk	8,690,005 (33.5)	10,857,000 (41.8)	3,208,517 (12.4)	202,536 (0.8)	140,662 (0.5)	2,499,622 (9.6)	366,471 (1.4)	25,964,812 (100.0)
Chung-nam	22,838,580 (40.5)	23,266,000 (41.2)	3,041,929 (5.4)	160,319 (0.3)	450,006 (0.8)	4,792,452 (8.5)	1,856,576 (3.3)	56,405,862 (100.0)
Jeon-buk	17,726,346 (36.0)	22,387,000 (45.5)	2,639,630 (5.4)	206,550 (0.4)	433,284 (0.9)	5,014,381 (10.2)	842,032 (1.7)	49,249,223 (100.0)
Jeon-nam	18,367,266 (26.8)	34,450,000 (50.2)	5,724,170 (8.3)	401,655 (0.6)	608,710 (0.9)	7,439,667 (10.8)	1,643,406 (2.4)	68,634,874 (100.0)
Gyeong-buk	19,880,855 (34.7)	21,084,000 (36.8)	9,375,297 (16.4)	281,549 (0.5)	335,876 (0.6)	5,857,730 (10.2)	515,437 (0.9)	57,330,744 (100.0)
Gyeong-nam	11,184,913 (32.0)	15,996,000 (45.8)	3,124,918 (8.9)	130,800 (0.4)	254,599 (0.7)	3,664,183 (10.5)	571,101 (1.6)	34,926,515 (100.0)
Jeju	3,069,809 (18.4)	9,950,000 (59.6)	2,105,171 (12.6)	105,674 (0.6)	32,690 (0.2)	1,441,205 (8.6)	0 (0.0)	16,704,548 (100.0)
Sum	136,057,992 (35.3)	166,717,000 (43.2)	34,900,921 (9.0)	1,751,200 (0.5)	2,695,859 (0.7)	36,628,843 (9.5)	7,074,068 (1.8)	385,825,880 (100.0)

Table 2. Nitrogen output in croplands

Province	Crop		Atmospheric outflow kg-N yr ⁻¹ (%)	Water system outflow kg-N yr ⁻¹ (%)	Sum kg-N yr ⁻¹ (%)
	Crop production kg-N yr ⁻¹ (%)	Crop byproduct kg-N yr ⁻¹ (%)			
Gang-won	4,732,378 (18.0)	3,395,600 (12.9)	3,329,918 (12.7)	14,765,448 (56.3)	26,223,344 (100.0)
Gyeong-gi	7,096,931 (14.1)	5,001,238 (9.9)	7,650,613 (15.2)	30,637,176 (60.8)	50,385,958 (100.0)
Chung-buk	4,271,407 (16.5)	3,430,778 (13.2)	3,410,701 (13.1)	14,851,926 (57.2)	25,964,812 (100.0)
Chung-nam	12,286,292 (21.8)	8,802,777 (15.6)	7,567,436 (13.4)	27,749,357 (49.2)	56,405,862 (100.0)
Jeon-buk	12,028,772 (24.4)	8,297,557 (16.8)	6,437,186 (13.1)	22,485,709 (45.7)	49,249,223 (100.0)
Jeon-nam	17,134,598 (25.0)	10,423,287 (15.2)	7,825,832 (11.4)	33,251,157 (48.4)	68,634,874 (100.0)
Gyeong-buk	11,266,172 (19.7)	11,509,764 (20.1)	6,760,954 (11.8)	27,793,855 (48.5)	57,330,744 (100.0)
Gyeong-nam	7,763,344 (22.2)	9,178,703 (26.3)	4,448,575 (12.7)	13,535,893 (38.8)	34,926,515 (100.0)
Jeju	2,671,678 (16.0)	546,219 (3.3)	2,171,666 (13.0)	11,314,985 (67.7)	16,704,548 (100.0)
Sum	79,251,572 (20.5)	60,585,922.5 (15.7)	49,602,881 (12.9)	196,385,506.0 (50.9)	385,825,880 (100.0)

분뇨 유래 양분유입 비중의 산정에서는 향후 가축분뇨 퇴비의 유통정보 관리를 통해 양분수지의 민감도를 향상시킬 필요가 있다. 생물학적질소고정에 의한 질소 유입량은 전라남도 0.4 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 경상북도 0.3 Ggyr⁻¹, 전라북도 0.2 Ggyr⁻¹ 순으로 나타났으며, 이와 같이 전라남도 지역에서 생물학적질소고정에 의한 질소 유입량이 크게 나타나는 것은 전라남도 지역의 대두 등 콩과작물의 재배면적이 넓은 데서 기인하였다. 도 단위 질소 양분수지 분석 결과 지역의 축산규모, 재배작물 등 농업특성에 따라 질소 유입항목별 질소 성분 유입량에 차이를 파악할 수 있었다. Table 2는 질소 양분수지 분석에서 질소 유출항목별 지역분포를 나타내고 있다. 작물생산에 의한 질소 유출은 전라남도가 17.1 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 충청남도 12.3 Ggyr⁻¹, 전라북도 12.0 Ggyr⁻¹으로 나타났다. 작물 부산물에 의한 질소유출은 작물생산에 의한 질소유출과 비슷한 경향을 나타내었으며, 질소 양분수지 분석에서 질소의 유출특성은 작물의 종류, 재배면적 등의 지역의 농업특성에 따라 차별화된 결과를 나타내었다.

도 단위로 분석한 인 양분의 유입현황은 Table 3과 같다.

가축분뇨에서 기인하는 부속유기질비료로 인한 인 유입량은 경기도가 7.0 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 다음으로 충청남도 6.1 Ggyr⁻¹, 경상북도 5.8 Ggyr⁻¹, 전라남도 5.0 Ggyr⁻¹의 순으로 나타났다. 또한 무기질비료 유래 인 유입량은 전라남도가 4.2 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 경상북도 3.5 Ggyr⁻¹, 충청남도 3.1 Ggyr⁻¹으로 나타났다. 유기질 비료 유래 인 유입량은 경상북도가 2.2 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 전라남도 1.3 Ggyr⁻¹, 충청북도 0.8 Ggyr⁻¹ 순으로 나타났다. 도 단위 인 양분유입에서 가축분뇨 유래 부속유기질비료가 차지하는 비중은 경기도가 인 유입양분의 67.5%를 차지하여 가축분뇨로 인한 인 유입 비중이 가장 높았으며, 제주도를 제외하고 대부분의 지역에서 가축분뇨 유래 인 유입 비중이 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 가축분뇨 유래 양분유입은 지역의 가축사육두수에 비례하는 경향이 있으나 가축분뇨 유래 질소 유입비중의 순위와 인 유입비중의 순위가 차이가 나는 이유는 가축분뇨 축종별 질소와 인의 함량 차이, 가축분뇨 자원화 과정 중 질소와 인의 거동 차이에서 기인한다. 인 수치 분석에서 인 양분유출 항목별 분석결과는 Table 4와 같다. 작물생산에 의한 인 양분의 유출은 전라

Table 3. Phosphorus input in croplands

Province	Livestock manure kg-P yr ⁻¹ (%)	Inorganic fertilizer kg-P yr ⁻¹ (%)	Organic fertilizer kg-P yr ⁻¹ (%)	Nitrogen fixation kg-P yr ⁻¹ (%)	Seed and planting materials kg-P yr ⁻¹ (%)	Atmospheric deposition kg-P yr ⁻¹ (%)	Irrigation water kg-P yr ⁻¹ (%)	Sum kg-P yr ⁻¹ (%)
Gang-won	1,971,746 (40.3)	2,141,048 (43.8)	733,462 (15.0)	-	28,873 (0.6)	-	17,483 (0.4)	4,892,613 (100.0)
Gyeong-gi	7,012,617 (67.5)	2,611,354 (25.1)	601,056 (5.8)	-	55,802 (0.5)	-	105,169 (1.0)	10,385,997 (100.0)
Chung-buk	2,250,744 (46.9)	1,734,498 (36.1)	753,671 (15.7)	-	27,296 (0.6)	-	34,718 (0.7)	4,800,927 (100.0)
Chung-nam	6,130,326 (59.8)	3,139,738 (30.6)	714,540 (7.0)	-	88,311 (0.9)	-	180,143 (1.8)	10,253,058 (100.0)
Jeon-buk	4,554,322 (57.5)	2,582,096 (32.6)	620,041 (7.8)	-	84,909 (1.1)	-	80,007 (1.0)	7,921,375 (100.0)
Jeon-nam	5,040,964 (46.4)	4,211,354 (38.7)	1,344,591 (12.4)	-	119,440 (1.1)	-	153,663 (1.4)	10,870,012 (100.0)
Gyeong-buk	5,862,565 (50.2)	3,506,987 (30.0)	2,202,230 (18.8)	-	66,222 (0.6)	-	50,374 (0.4)	11,688,378 (100.0)
Gyeong-nam	3,178,072 (48.9)	2,486,463 (38.3)	734,034 (11.3)	-	49,741 (0.8)	-	51,783 (0.8)	6,500,093 (100.0)
Jeju	899,902 (22.9)	2,531,004 (64.4)	494,498 (12.6)	-	6,020 (0.2)	-	0 (0.0)	3,931,425 (100.0)
Sum	36,901,258 (51.8)	24,944,542 (35.0)	8,198,123 (11.5)	-	526,614 (0.7)	-	673,340 (0.9)	71,243,878 (100.0)

남도가 3.5 Ggyr⁻¹으로 가장 높았으며, 경상북도 2.9 Ggyr⁻¹, 충청남도 2.7 Ggyr⁻¹, 전라북도 2.6 Ggyr⁻¹으로 나타났다. 작물생산에 의한 인 유출은 질소 유출과 유사한 경향을 나타내었으며, 이는 기본적으로 작물생산에 의한 질소, 인의 유출은 작물생산수량에 기초하는데서 비롯하기 때문이다.

국내 도 단위 양분수지 분석에서 제주도의 경우, 무기질비료의 농경지 투입 비중은 질소성분 59.6%, 인성분 64.4%로 나타나 다른 도와 비교하여 무기질 비료의 투입 비중이 큰 것으로 나타났다. 특히, 양분의 유출 특성에서는 전체 질소성분 유출의 67.7%가 수계유출로 평가되었으며, 인성분 유출의 78.1%가 수계유출로 평가되어 다른 도와 비교하여 인성분의 수계유출 비중이 매우 크게 평가되었다. 이는 현무암에서 유래한 제주도 토양의 높은 인산흡수계수 특성에서 기인하는 것으로 판단된다. 인산흡수계수가 큰 제주도 토양에서는 인성분의 작물 이용율을 매우 낮고, 유입 인성분의 대부분이 토양에 고정되는 특성이 있다(Sanyal *et al.* 1993; Kim *et al.* 2016). 즉, 본 연구의 양분수지 분석에서는 토양 중 양분의 변동(증감량)을 고려하지 않고 있어, 토양 중에 고정되는 인성분의 양이 모두

수계유출로 평가되는 한계가 있다. 따라서 제주도 지역의 양분수지 분석에서는 지역의 토양 특성으로 인한 인 성분의 토양고정을 고려하여 양분수지를 분석할 필요가 있다. KLEI(2018)는 기준년도 2015년에 농경지(토양)을 경계 조건으로 하여 국내 양분수지를 산출하였으며, 산출한 국내의 양분 유입량은 492,881 Mg-N yr⁻¹, 86,224 Mg-P yr⁻¹으로 나타났다고 보고하였다. 이는 본 연구에서의 양분유입 385,826 Mg-N yr⁻¹, 71,244 Mg-P yr⁻¹와 비교하여 큰 차이를 보인다. 이러한 차이는 1차적으로 양분수지 산출 기준년도의 차이로 인한 재배작물, 작물별 재배면적, 작물별 생산성의 변동에서 기인하며, 2차적으로 연구자마다 사용하는 조정계수(가축분뇨 자원화 계수, 생물학적 질소고정 계수, 작물부산물 계수 등)의 차이에서 기인할 수 있다. 따라서 합리적인 양분관리제도의 도입을 위해서는 양분수지 산출을 위한 다양한 원단위, 통계자료, 조정계수 등의 표준화가 요구되고 있다. 최근에는 양분수지 관련 전문가들 간의 양분수지 산출 방법론의 표준화를 위한 노력이 진행되고 있으며, 이러한 양분수지 산출 방법론의 표준화는 지역의 농업환경을 잘 반영하는 방향으로 정립되어야

Table 4. Phosphorus output in croplands

Province	Crop		Atmospheric outflow kg-P yr ⁻¹ (%)	Water system outflow kg-P yr ⁻¹ (%)	Sum kg-P yr ⁻¹ (%)
	Crop production kg-P yr ⁻¹ (%)	Crop byproduct kg-P yr ⁻¹ (%)			
Gang-won	2,282,097 (46.6)	613,246 (12.5)	-	1,997,270 (40.8)	4,892,613 (100.0)
Gyeong-gi	1,683,684 (16.2)	1,140,968 (11.0)	-	7561,344 (72.8)	10,385,997 (100.0)
Chung-buk	1,135,321 (23.6)	733,615 (15.3)	-	2,931,992 (61.1)	4,800,927 (100.0)
Chung-nam	2,698,743 (26.3)	2,037,974 (19.9)	-	5,516,341 (53.8)	10,253,058 (100.0)
Jeon-buk	2,570,613 (32.5)	1,883,336 (23.8)	-	3,467,426 (43.8)	7,921,375 (100.0)
Jeon-nam	3,545,396 (32.6)	2,222,962 (20.5)	-	5,101,653 (46.9)	10,870,012 (100.0)
Gyeong-buk	2,864,630 (24.5)	2,287,433 (19.6)	-	6,536,315 (55.9)	11,688,378 (100.0)
Gyeong-nam	1,905,775 (29.3)	1,447,189 (22.3)	-	3,147,129 (48.4)	6,500,093 (100.0)
Jeju	787,204 (20.0)	73,850 (1.9)	-	3,070,371 (78.1)	3,931,425 (100.0)
Sum	19,473,463 (27.3)	12,440,573 (17.5)	-	39,329,841 (55.2)	71,243,878 (100.0)

Table 5. Comparison between nutrient loading and the balance index

Province	Nutrient loading index		Nutrient balance index	
	Nutrient loading rate ¹⁾ (-)		Nutrient balance ²⁾ (kg ha ⁻¹)	
	N	P	N	P
Gang-won	1.57	1.82	14705	19.89
Gyeong-gi	2.39	2.63	19788	48.84
Chung-buk	1.74	1.78	13780	27.20
Chung-nam	2.09	2.06	134.29	26.70
Jeon-buk	1.85	1.54	104.00	16.04
Jeon-nam	1.82	1.52	103.66	15.90
Gyeong-buk	1.77	1.85	110.04	25.88
Gyeong-nam	1.45	1.51	85.68	19.92
Jeju	1.28	1.84	182.09	49.41
Average	1.77	1.84	133.61	27.75

$${}^1) \text{ Nutrient loading} = \frac{\text{Nutrient input}}{\text{Nutrient carrying capacity}}$$

$$\text{Nutrient input} = \text{Live stock fertilizer} + \text{Inorganic fertilizer} + \text{Organic fertilizer}$$

$${}^2) \text{ Nutrient balance means the watersystem outflow at Eq. (2)}$$

할 것이다.

2. 농경지 양분수지와 양분부하 비교

도 단위 양분수지와 양분부하 분석 결과는 Table 5와 같

다. 도 단위 농경지 질소성분의 양분요구량 대비 투입 질소성분량의 비율을 나타내는 양분부하도는 경기도가 2.39로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 충청남도 2.09, 전라북도 1.85, 전라남도 1.82, 경상북도 1.77, 충청북도 1.74, 강

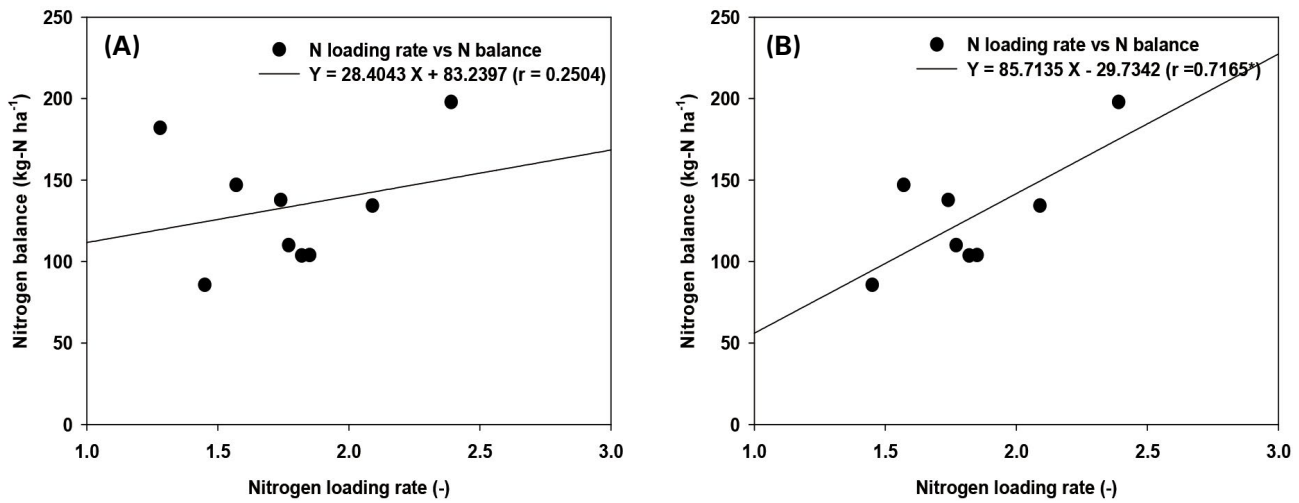


Fig. 2. Correlation between the nitrogen loading rate and balance (Figure B does not include the data from Jeju province).

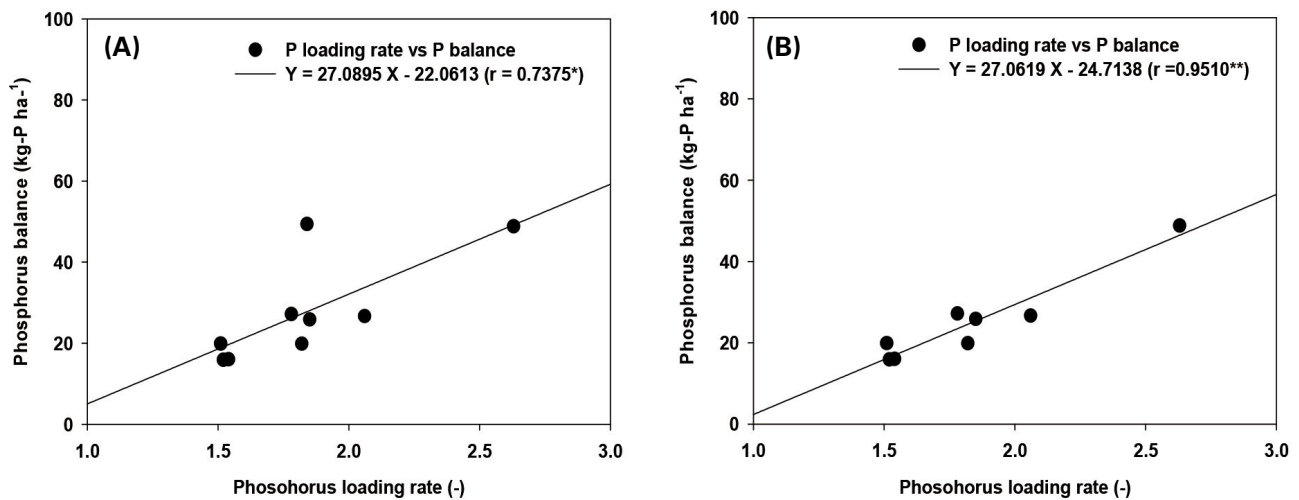


Fig. 3. Correlation between the phosphorus loading rate and balance (Figure B does not include the data from Jeju province).

원도 1.57, 경상남도 1.45, 제주도 1.28 순으로 나타났다. 또한 양분수지 분석을 통하여 산출한 질소성분의 수계양분 유출 잠재량은 경기도 197.9 kg ha⁻¹, 제주도 182.1 kg ha⁻¹, 강원도 147.1 kg ha⁻¹, 충청북도 137.8 kg ha⁻¹, 충청남도 134.3 kg ha⁻¹, 경상북도 110.0 kg ha⁻¹, 전라북도 104.0 kg ha⁻¹, 전라남도 103.7 kg ha⁻¹, 경상남도 85.7 kg ha⁻¹으로 나타나 질소 양분부하 지표와 양분수지 지표의 순위가 일치하지 않는 것으로 나타났다. 단위 농경지 인성분의 양분부하도는 경기도 2.63, 충청남도 2.06, 경상북도 1.85, 제주도 1.84, 강원도 1.82, 충청북도 1.78, 전라북도 1.54, 전라남도 1.52, 경상남도 1.51 순으로 나타났으며, 농경지 인성분의 수계

양분유출 잠재량은 제주도 49.4 kg ha⁻¹, 경기도 48.8 kg ha⁻¹, 충청북도 27.2 kg ha⁻¹, 충청남도 26.7 kg ha⁻¹, 경상북도 25.9 kg ha⁻¹, 경상남도 19.9 kg ha⁻¹, 강원도 19.9 kg ha⁻¹, 전라북도 16.0 kg ha⁻¹, 전라남도 15.9 kg ha⁻¹로 나타나 지역별 양분부하 지표와 양분수지 지표의 순위가 일치하지 않았다. 양분부하와 양분수지의 지역별 순위가 일치하지 않는 이유는 해당지역의 가축분뇨 자원화 방식(퇴·액비)에 따라 토양으로 투입되는 양분유입 정도가 상이하고, 재배작물의 종류에 따라 작물 바이오매스 생산량에 차이가 있어 작물생산을 통해 농경지에서 유출되는 양분유출량의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 또한 콩과작물의 재배면적에

따라 토양 질소고정량에 차이를 나타내는 등 지역의 농업 환경 특성이 양분수지 산출에 영향을 주기 때문이다. 양분부하 지표의 경우는 지표의 산출에 있어 해당지역의 농경지 면적, 작물별 시비요구량을 기초로 하여 농경지의 비료 성분 요구량(수용량)을 구하고, 이에 대한 유입 양분의 비율로 산출한다. 반면, 양분수지 지표의 경우는 유입양분에서 작물별 바이오매스 생산량을 고려하여 농경지에서의 양분유출량을 산출하고 대기로의 유출량을 산출한 후 수계유출 환경영향을 평가한다. 따라서 양분수지 지표가 실질적인 수계유출 등 환경영향을 더욱 합리적으로 반영하는 결과로 판단된다. Kim *et al.* (2017b)은 벼논에서 양분관리별 탄소수지 지표를 평가한 바 있으며, 농경지에서의 탄소수지 지표는 온실가스 배출저감 및 토양 및 작물의 탄소 축적 수준을 파악하는데 효율적인 평가지표로 평가한 바 있다. 특히, Roh *et al.* (2009)은 벼농사에서 질소수지의 수질환경 영향을 평가하였다. 본 연구에서 질소 시비량이 110 kg ha^{-1} , 수확량이 100%인 경우, 우리나라 벼 재배 논에서의 질소수지는 -0.3 kg ha^{-1} 이었으며, 질소시비량을 90 kg ha^{-1} 으로 줄이고 수확량도 100%에서 90%와 85%로 줄이면 질소수지는 각각 -11.7 kg ha^{-1} , -2.3 kg ha^{-1} 및 2.4 kg ha^{-1} 으로 평가되어 시비량을 줄이면서 수확량도 감소하면 오히려 질소수지의 개선효과가 떨어지게 되며, 수량이 85%가 되면 질소수지에 의한 수질 영향은 110 kg ha^{-1} 을 시비할 때보다 오히려 더 나빠지는 것으로 평가하였다. 이러한 연구결과는 양분부하의 저감이 직접적으로 양분의 수계유출을 개선시키는 것이 아니며, 양분의 수계유출은 작물 생산성이 큰 영향을 미치고 있음을 시사한다.

지역별 질소와 인성분에 대한 양분수지와 양분부하 지표 간의 상관관계를 분석한 결과 Figs. 2, 3과 같다. 질소 성분의 경우 양분수지와 양분부하의 상관관계 분석에서 상관관계 계수(r)는 0.2504로서 유의수준 5%에서 통계적으로 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 토양의 특성을 달리하는 제주도 지역을 제외한 양분수지와 양분부하의 상관관계 분석에서 상관관계 계수(r)는 0.7165로 크게 증가하였으나 유의수준 5%에서 통계적으로 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 인성분의 양분수지와 양분부하의 상관관계 분석에서는 상관관계 계수(r)가 0.7375로서 유의수준 5%에서 통계적으로 상관관계가 있는 것 나타났으며, 토양의 특성을 달리하는 제주도 지역을 제외한 양분수지와 양분부하의 상관관계 분석에서는 상관관계 계수(r)가

0.9510으로서 유의수준 1%에서 통계적으로 상관관계가 나타나는 것으로 평가되었다. 따라서 인성분의 경우 양분수지와 양분부하의 상관도가 커서 양분수지 지표와 양분부하 지표의 사용에 있어 호환성이 높을 것으로 판단되나, 질소성분의 경우 양분수지와 양분부하의 상관도가 매우 낮아 양분수지 지표 또는 양분부하 지표의 사용 여부에 따라 지역의 양분상태가 다르게 평가될 수 있는 것으로 평가되었다.

질소와 인성분의 양분부하와 양분수지의 상관관계가 상이한 이유는 질소성분의 경우 농업환경에서의 거동이 다양한 물리적, 화학적, 미생물학적 반응에 의해 영향을 받으며, 농경지와 경계하는 대기권, 수권, 생물권, 토양권에서 휘발, 탈질, 고정 등의 다양한 전환 및 이동이 일어나는 특성에 있다. 따라서 해당지역의 농업환경 특성에 따른 다양한 변이요인이 작용하고, 이러한 변이요인은 질소성분의 양분수지에 큰 영향을 미친다. 그러나 인성분의 경우 대기로의 휘발이 일어나지 않으며, 주로 토양 중에 고정되는 특성이 있어 농업환경에서의 거동이 단순하여 농경지로 투입된 인성분량의 이동이 크게 나타나지 않는 데서 기인한다. 양분수지 지표는 다양한 양분의 유입경로와 유출 경로를 고려하고 있다는 측면에서 지역별 농업환경(작물, 토양, 대기, 물 등)의 특성을 어느 정도 반영하는 농업환경 지표이다. 반면에 양분부하는 작물의 양분요구도(작물별 시비기준)에 대한 비료성분의 투입부하를 의미한다. 양분부하와 양분수지의 상관관계 분석에서 질소성분의 경우 통계적으로 유의성이 없는 상관계수를 나타내었다. 이는 질소성분의 경우 양분부하 지표와 양분수지 지표가 서로 다른 의미를 지니고 있다는 것을 의미한다. Kim and Kim (2003)은 친환경농업 시스템 구축을 위한 지역단위 물질 균형 분석에서 지역의 양분부하 정도는 지역의 기후적·지형적·환경적 자정능력 정도에 따라 달라진다고 하였으며, 양분수지는 지역별 농업생산 여건에 따라 큰 차이가 발생하므로 지역별 양분부하 정도도 다르다고 하였다. 통계적으로 질소성분의 양분부하 지표는 양분수지 지표와 다른 값을 나타내어 지역특성을 반영하는 데는 한계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 과학적인 방법론에 기반하는 합리적인 양분관리제도의 도입을 위해서는 지역의 농업환경 특성을 반영하는 양분관리 지표의 활용이 더 합리적인 것으로 판단된다.

적 요

최근 농경지 투입양분으로 인한 환경영향의 우려와 함께 하천 등으로 유출되는 양분의 오염부하 관리가 요구되고 있다. 이에 정부는 국내 농지의 양분 과잉 투입 문제를 해결하기 위해 농경지의 양분관리 목표를 설정하여 관리하는 양분관리제도의 도입을 추진하고 있다. 본 연구는 국내 합리적인 양분관리제도 도입을 위한 양분관리 지표 기준을 설정하고자 도 단위의 양분부하와 양분수지 지표를 분석하고 지표별 특성을 비교 검토하였다. 도 단위 질소와 인성분의 양분부하와 양분수지 분석에서 지역별 양분부하 순위와 양분수지 순위가 다르게 나타나, 지역의 양분수준을 평가하는데 있어 양분부하와 양분수지의 두 지표는 서로 상이한 지표 값을 도출하는 것으로 나타났다. 양분부하와 양분수지 간의 상관관계 분석에서 질소성분의 경우 상관관계 계수(r)는 0.2504로서 5% 유의수준에서 통계적 유의성이 없었으며, 인성분의 경우 상관관계 계수(r)가 0.7375로서 5% 유의수준에서 통계적 유의성이 인정되었다. 따라서 양분관리 지표활용에 있어 인성분의 경우 양분부하와 양분수지 간의 상호 호환성이 나타났으나, 질소성분의 경우 양분부하와 양분수지 간의 상호 호환성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 지역의 양분관리 지표로서 농업환경 특성을 반영하는 양분수지 지표의 활용이 합리적인 것으로 평가되었다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01432701)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Chen X, X Liu, W. Peng, F Dong, Z Huang and R Wang. 2018. Non-point source nitrogen and phosphorus assessment and management plan with an improved method in data-poor regions. *Water* 10:17.
- Choi SG, MG Kim, GH So and TI Jang. 2016. Application of APEX-PADDY model considering paddy environment. *Mag. Korean Soc. Agric. Eng.* 58:23-27.
- Gomez KA and AA Gomez. 1984. *Statistical Procedures for Agricultural Research*. 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Kim CG and TY Kim. 2003. Analysis of regional mass balance for the establishment of eco-friendly agriculture system. *Rural Econ.* 26:1-24.
- Kim DW, HD Ryu, DY Lim, EG Chung and YS Kim. 2017a. Development of a nutrient budget model for livestock excreta survey. *J. Korean Soc. Water Environ.* 33:769-779.
- Kim GY, JS Lee, SI Lee, HC Jung, EJ Choi and US Na. 2017b. Evaluation of carbon balance for carbon sink/emission with different treatments in paddy field. *Korean J. Environ. Biol.* 35:715-725.
- Kim MS, SJ Park, CH Lee, SG Yun, BG Ko and JE Yang. 2016. Characteristics of phosphorus adsorption of acidic, calcareous, and plastic film house soils. *Korean J. Soil Sci. Fertil.* 49:789-794.
- KLEI. 2018. *Development of Nutrient Management Manual*. Korea Livestock Economic Institute. Seoul, Korea.
- KREI. 2005. *Study on implementation plan of regional nutrient management institution*. Korea Rural Economic Institute. Naju, Korea.
- KREI. 2015. *Study on introduction of nutrient management institution*. Korea Rural Economic Institute. Naju, Korea.
- Leip A, W Britz, F Weiss and W de Vries. 2011. Farm, land, and soil nitrogen budgets for agriculture in Europe calculated with CAPRI. *Environ. Pollut.* 159:3243-3253.
- MAFRA. 2013. *Action plan for long term livestock manure recycling*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Sejong, Korea.
- MAFRA. 2018a. *Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Sejong, Korea.
- MAFRA. 2018b. *Survey for livestock trend*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Sejong, Korea.
- ME. 2015. *The 2nd basic plan for the management of water environment*. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- ME-MAFRA. 2004. *Integrated actions for the management and utilization of livestock manure*. Ministry of Environment, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- ME-MAFRA. 2016. *Study on introduction of cropland nutrient management institution*. Ministry of Environment, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- NACF. 2017. *Fertilizer business statistics*. National Agricultural Cooperative Federation. Seoul, Korea.
- OECD.stat. 2019. *Data and metadata for OECD countries and selected non-member economies*. Organization for Eco-

- conomic Cooperation and Development. <https://stats.oecd.org>.
- OECD. 2013. OECD Compendium of agri-environmental indicators. Organization for Economic Cooperation and Development. Paris, France.
- Roh KA, MK Kim, BG Ko, GY Kim, KM Shim and DB Lee. 2009. Estimation of rice cultivation impacts on water environment with environmental characteristics and agricultural practices by nitrogen balances. *Korean J. Soil Sci. Fertil.* 42:439-446.
- Sanyal SK, SK de Datta and PY Chen. 1993. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of south and southeast Asia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:937-945.