

# Study of Methodology Estimating the Net Nitrogen Balance for the Management of Regional Nutrient Balance

Jun-Hyeong Lee<sup>1</sup>, Jae Ho An<sup>2</sup>, Eulsaeng Cho<sup>3</sup>, and Young-Man Yoon<sup>1,4\*</sup><sup>1</sup>Ph.D. Candidate, Department of Plant Life and Environmental Science, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea<sup>2</sup>Professor, Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea<sup>3</sup>Senior Research Fellow, Department of Land and Water Environment Research, Korea Environment Institute, Sejong 30147, Korea<sup>4</sup>Professor, Biogas Research Center, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea\*Corresponding author: [yyman@hknu.ac.kr](mailto:yyman@hknu.ac.kr)

## ABSTRACT

Received: February 24, 2021

Revised: May 31, 2021

Accepted: May 31, 2021

## ORCID

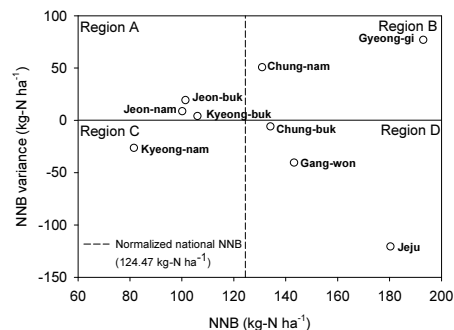
Jun-Hyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7394-7340>

Young-Man Yoon

<https://orcid.org/0000-0001-9294-8277>

The Ministry of Environment (ME) is promoting the introduction of the regional nutrient management system as the target year for 2021 in order to manage the amount of nutrients (nitrogen and phosphorus) input to agricultural land at an appropriate level. The nutrient balance of Korea has been reported to be 212 kg ha<sup>-1</sup> of nitrogen and 46 kg ha<sup>-1</sup> of phosphorus, and the nitrogen balance is at the highest level in the OECD member countries. Nutrient input to agricultural land is composed of inorganic fertilizers (chemical fertilizers), composted organic fertilizers (livestock manure compost, etc.), and organic fertilizers (oil meal fertilizers, etc.). Fertilizer application could be limited in the region which excess nutrients (nitrogen and phosphorus) have been loaded to agricultural land. Nutrient input to agricultural land have a beneficial function improving soil fertility and productivity of crops. However, excess nutrient input to agricultural land might have a drawback releasing non-point sources to water system such as river and lake. Therefore, it is necessary to consider both the environmental effect of reducing non-point contaminants due to the reduction of input nutrients in agricultural land and the agricultural production aspect of reducing agricultural productivity by setting the regional nutrient balance management goals. In this study, the methodology to estimate crop yield response according to regional nitrogen loading rate was established for the reasonable management of regional nitrogen balance and regional appropriate nitrogen balance index (net nitrogen balance) was estimated considering the affect of agricultural production. Based on our results, it was possible to understand the effect of regional nutrient management on agricultural production and the outflow of nutrients to water systems by methodology estimating the net nitrogen balance for the management of regional nutrient balance.

**Keywords:** Crop yield response, Gross nitrogen balance, Net nitrogen balance, Nutrient loading rate, Soil budget

Regional classification for the nutrient balance management by NNB (net nitrogen balance).



## Introduction

2017년 기준 우리나라 국가 양분수지 (nutrient balance)는 경제협력개발기구 (OECD) 회원국 중에서 질소수지 1위 (질소  $212 \text{ kg ha}^{-1}$ ), 인수지 2위 ( $46 \text{ kg ha}^{-1}$ )로 보고되고 있다 (OECD, 2021). 따라서 농업생산 과정에서 농경지로 투입되는 과도한 양분 (질소, 인)으로 인한 비점오염원 유출 등 농업환경에 대한 악영향이 우려되고 있다. 우리나라는 지난 20여 년간 가축분뇨 퇴·액비 및 무기질비료 (화학비료)의 사용 저감을 위하여 다양한 친환경 농업 정책을 추진하였으나, 아직까지 국가 차원에서 농경지 양분투입량을 합리적으로 관리하기 위한 정책수단은 미미한 실정이다. 따라서 환경부는 2021년을 목표연도로 하여 농경지로 투입되는 양분을 과학적으로 관리하는 지역단위 양분관리제도의 도입을 추진하고 있다. 지역단위 양분관리제도는 2004년 가축분뇨 자원화와 적정관리를 위한 수단으로 가축분뇨 관리·이용 대책 (ME·MAFRA, 2004)의 수립 과정에서 처음으로 등장하였으며, 지역단위 양분관리제도는 가축사육 밀집 지역에서의 과도한 양분 유출을 방지하고, 축산으로 인한 비점오염원 저감을 위한 정책 방안으로 제시된 바 있다. 2005년 지역단위 양분총량제도 도입 세부시행방안 연구 (KREI, 2005)에서는 과잉양분을 효과적으로 관리하기 위하여 지역별 양분부하에 관한 과학적인 진단과 농축산 부문의 생산 활동과 투입 자재를 조절함으로써 지역의 양분부하를 균형수준에 도달시키는 것을 정책목표로 양분의 총량관리제도 도입방안을 검토하였다. 2016년 양분총량제 도입을 위한 기반조성 연구 (ME·MAFRA, 2016)에서는 양분관리제도 도입을 위한 과학적 양분수지 분석 모델을 수립하고, 양분수지에 의한 양분관리제도 방안을 제시하면서 토양 경계조건의 지역단위 양분수지 분석모델이 제시된 바 있다.

양분수지 (nutrient balance)는 일정한 경계 (지역, 농경지, 농가)를 조건으로 하여 경계 내로 유입되는 양분과 경계 밖으로 유출되는 양분의 수지 (유입양분량-유출양분량)를 의미한다. 일반적으로 경계조건을 기준으로 하여 유입되는 양분과 유출되는 양분의 수지는 “0”으로 간주하나, 유입과 유출 양분의 수지가 “+”인 경우에는 양분이 과도한 경우이고, “-”인 경우에는 양분이 부족한 경우이다. Leip et al. (2011)은 양분수지의 산출에서 경계조건에 따라 농가수지 (farm budget), 토지수지 (land budget), 토양수지 (soil budget)로 구분하고, 양분수지 산출 방법론을 비교하였다. 농가수지는 양분의 유입과 유출의 경계조건을 농가로 설정하여 분석한 것으로 네덜란드의 MINAS (mineral accounting system)이 대표적이다. 토지수지는 양분의 유입과 유출의 경계를 토지 (지역) 경계로 설정하여 분석한 것으로 경제협력개발기구 (OECD)의 양분수지 지표 산출에 적용하고 있는 방법론이며, 토양수지는 양분의 유입과 유출의 경계를 토양 (농경지)을 경계로 설정하여 분석한 것으로 2016년 양분총량제 도입을 위한 기반조성 연구 (ME·MAFRA, 2016)에서 토양수지를 기초로 하여 지역단위 양분수지 산출이 이루어진 바 있다. 지금까지 국내 양분수지 관련 연구는 주로 지역단위 양분수지 산출 방법론 개발을 중심으로 진행되었다. Lim et al. (2017)은 국내 가축분뇨 자원화 특성을 고려하여 OECD의 질소수지 방법론을 국내 지역단위 질소수지 산출에 적용한 사례가 있으며, Lee and Yoon (2019)은 농경지 양분수지 관리에 있어 양분수지와 양분부하 지표를 비교 분석하고, 양분수지 지표가 지역의 농업생산 및 농업환경 특성을 잘 반영한다고 보고하였다.

지금까지 국내 양분관리제도 도입 관련 연구는 지역의 양분수지 현황을 파악하는 지역 양분수지 산출 방법론 개발에 집중하였으며, 지역의 양분수지 관리를 위한 적정양분 수지 관리목표를 설정하는 연구는 매우 미미한 상황이다. 지역단위 양분관리제도 시행에 따라 양분 과다지역의 경우 농경지로 투입되는 양분의 투입이 크게 제한 될 수 있다. 특히, 우리나라는 가축분뇨의 처리에 있어 약 90%를 자원화 (퇴비, 액비) 처리하고 있어 가축사육 밀집지역의 경우 농경지 양분투입의 제한이 가축사육두수 규제에 영향을 줄 수 있다. 따라서 지역단위 양분관리제도의 도입에서 적절한

양분관리 목표 지표를 설정하는 것은 중요한 과제이다. 특히, 농경지 투입양분은 토양의 비옥도를 향상시키고 작물의 생산성을 증대시키는 순기능을 가지는 반면, 농경지 과다양분에서 기인하는 비점오염원 유출로 수질을 악화시키는 역기능을 함께 가지고 있다. 따라서 지역단위 양분수지의 관리목표를 설정하는데 있어, 농경지 비점오염원 저감이라는 환경적인 효과 측면과 농업 생산성 감소라는 농업생산 측면을 함께 고려할 필요가 있다. 지금까지 지역단위 양분관리를 위한 관리목표 지표는 양분초과율 지표가 제안된 바 있다 (KREI, 2015). 그러나 양분초과율 지표는 단순히 농경지에서의 양분요구량 대비 농경지로 투입되는 양분초과량의 비율로서 농경지로 투입되는 양분의 부하정도만을 나타낼 뿐, 양분의 수계유출 잠재량, 농업 생산성 저감 영향 등의 농업 및 환경적인 측면에 대한 영향을 파악할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 과학적인 지역단위 양분관리를 위하여 지역의 양분부하와 양분수지, 농업생산 간의 상관관계 분석을 통해 지역단위 양분부하의 변동이 양분수지 및 농업생산성 변동에 미치는 영향을 함께 파악할 수 있는 양분수지 지표의 관리목표를 도출하고 농경지 양분투입 저감이 농업생산과 수계 양분유출에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 방법론을 개발하고자 하였으며, 개발한 방법론을 이용하여 도 단위 양분수지 분석자료를 기반으로 지역별 양분관리 특성을 조사·분석하였다.

## Materials and Methods

**지역 양분부하 및 양분수지 분석** 본 연구에서 농경지 양분수지 (질소, 인 수지)와 양분부하 (질소, 인 부하)의 분석을 위한 분석모델은 Fig. 1과 같다. 양분수지 분석은 농경지 (토양)를 경계조건으로 설정하였으며 (Leip et al., 2011), 농경지로 유입되는 양분과 유출되는 양분은 Eq. 1과 같이 동일한 것으로 가정하였다. 농경지 양분수지 분석모델에서 주요한 양분의 유입 항목은 농업생산을 위해 투입하는 무기질 비료 (화학비료), 가축분뇨에서 기인하는 부숙 유기질 비료 (가축분뇨 퇴·액비), 유기질 비료 (유박비료 등)를 항목으로 설정하였다. 비료성분의 투입과 관련한 농업 활동 이외에 경작지 내에서의 생물학적 질소고정, 종자 및 종묘투입, 녹비작물, 대기강하물, 관개용수에서 기인하는 양분유입 항목을 모델에 반영하였다. 농경지 양분유출은 농업생산물 (농산물 및 가축 조사료) 및 부산물 (기타 조사료 및 고형연료) 생산 등에서 기인하는 양분 유출 항목과 양분의 지하침출, 유거에 의한 수계유출 항목, 휘발 ( $\text{NH}_3$ ) 및 탈질 ( $\text{N}_2\text{O}$ )에 의한 대기 유출 항목을 설정하였다. 양분수지 분석을 통해 산출한 양분수지 지표는 순양분수지 (net nutrient balance, NNB)로 설정하였으며, 순양분수지는 Eq. 2와 같이 농경지 투입양분 중에서 수계로 유출되는 양분의 잠재량을 의미한다. 양분부하 지표는 Eq. 3과 같이 농경지에서 작물의 재배를 위해 요구되는 양분의 수용용량 (carrying capacity)에 대한 비료성분의 투입량의 비율로 산정하였다.

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

$$\text{순양분수지} (b) = \text{양분유입} (A) - \text{작물 생산 양분유출} (a) - \text{대기유출} (c) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{양분부하} = \frac{\text{농경지 양분 유입량} (B)}{\text{농경지 양분 요구량} (C)} \quad (\text{Eq. 3})$$

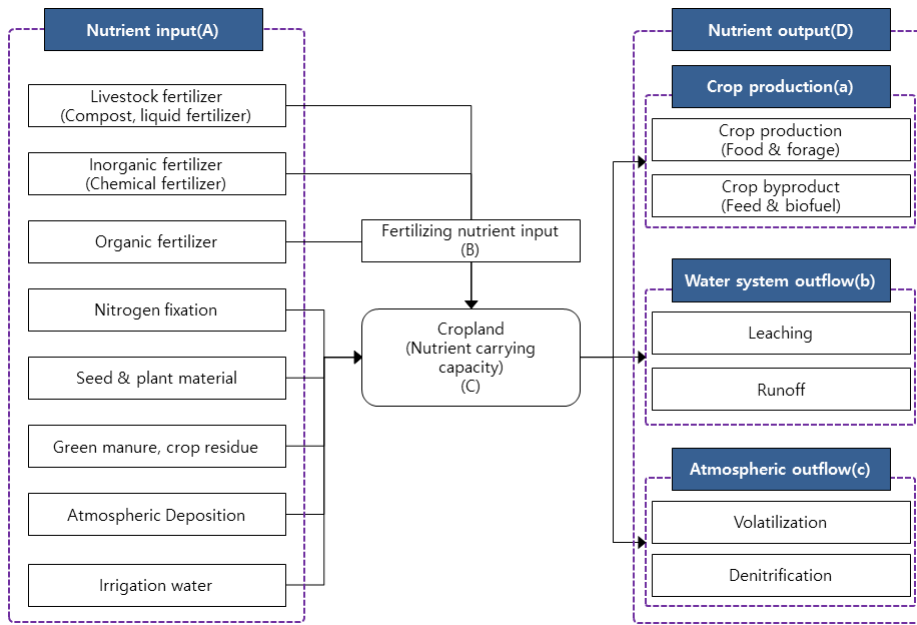


Fig. 1. Model for the nutrient balance analysis of cropland.

**양분부하 (nutrient loading) 분석** 지역단위 양분부하는 작물별표준시비량을 기준으로 하는 농경지 양분 수용 용량 대비 양분 투입량으로 정의하였다. 양분부하 산출을 위한 투입양분은 화학비료공급량, 가축분뇨 퇴·액비, 유기 질비료에서 기인하는 질소, 인으로 한정하였으며, 농경지 양분 수용용량은 작물별 표준시비량을 기준으로 작물별 재 배면적에 작물별 시비기준을 곱하여 산출하였다. 또한, 시설원예 하우스의 경우에는 연간 2작기 이상을 가지는 시설 원예 하우스의 집약적 생산체계를 반영하여 시설원예작물 양분수요 조정계수 (ME·MAFRA, 2016)를 산정하여 양 분부하를 Table 1과 같이 산출하였다.

Table 1. Equations for calculation of nutrient loading rate.

Nutrient loading	Equations
Nutrient loading ratio (NLR)	$NLR_{field\ crop} + NLR_{greenhouse\ crop}$ [NLR <sub>field crop</sub> (-) : nutrient loading ratio of field crop, NLR <sub>greenhouse crop</sub> (-) : nutrient loading ratio of greenhouse crop]
Nutrient loading ratio (NLR <sub>field crop</sub> )	$\left(\sum_{i=1}^n NL_i\right) \div \left(\sum_{j=1}^n (CA_j \times SFI_j)\right)$ [NL <sub>i</sub> (kg yr <sup>-1</sup> ) : nutrient (N, P) input amount by fertilizer type (i), CA <sub>j</sub> (ha) : crop cultivation area by crop type (j), SFI <sub>j</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) : standard fertilization criteria by crop type (j)]
Nutrient loading ratio (NLR <sub>greenhouse crop</sub> )	$\left(\sum_{i=1}^n NL_i\right) \div \left(\sum_{j=1}^n (CA_j \times SFI_j \times C_j)\right)$ [NL <sub>i</sub> (kg yr <sup>-1</sup> ) : nutrient (N, P) input amount by fertilizer type (i), CA <sub>j</sub> (ha) : crop cultivation area by crop type (j), SFI <sub>j</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) : standard fertilization criteria by crop type (j), C <sub>j</sub> (%) : fertilization correction factor by crop type (j)]

**양분수지 (nutrient balance) 분석** 지역단위 양분수지 분석은 토양수지 (soil budget) 산정법에 근거하여 행정 구역상 도 단위를 기준으로 실시하였으며 (Leip et al., 2011), Table 2와 Table 3과 같이 양분의 유입 및 유출 항목을 산출하였다.

**Table 2.** Equations for calculation of nutrient input amount.

Nutrient input		Equations
N1)	Inorganic fertilizer (IOF <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_i^n F_i C_i$ [ $F_i$ (kg yr <sup>-1</sup> ) : supply by fertilizer type (i), $C_i$ (%) : nutrient content by fertilizer type (i)]
N2)	Livestock fertilizer (LF <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_m^n (\sum_l^n (\sum_k^n (\sum_{i,j}^n LH_i \times LM_j) \times LFP_k) \times LFC_l) \times LFT_m$ [ $LH_i$ (heads) : head number by livestock type (i), $LM_j$ (kg yr <sup>-1</sup> ) : livestock excretion unit by livestock type (j), $LFP_k$ (%) : ratio of livestock fertilizer type (compost, liquid fertilizer) (k), $LFC_l$ (%) : nutrient content of livestock fertilizer type (l), $LFT_m$ (%) : nutrient conversion coefficient during livestock fertilizer production by fertilizer type (m)]
N3)	Organic fertilizer (OF <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_i^n OF_i \times OFC_i$ [ $OF_i$ (kg yr <sup>-1</sup> ) : supply by organic fertilizer type (i), $OFC_i$ (%) : nutrient content by organic fertilizer type (i)]
N4)	Nitrogen fixation (BNF <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_i^n BNC_i \times (1 + P_i) \times BM_i \times BNFU_i$ [ $BNC_i$ (kg yr <sup>-1</sup> ) : crop production by leguminous crop type (i), $P_i$ (%) : crop factor (byproduct production/grain production) by leguminous crop type (i), $BM_i$ (%) : dry matter content of biomass by leguminous crop type (i), $BNFU_i$ (kg-N kg <sup>-1</sup> -DM) : biological nitrogen fixation unit by leguminous crop type (i)]
N5)	Atmospheric deposition (AP <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_{i,j}^n A_i \times APU_j$ [ $A_i$ (ha) : cultivation area by crop type (i), $APU_j$ (kg-N ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> ) : Atmospheric deposition coefficient by deposition type (Wet & dry deposition) (j)]
N6)	Seed & plant material (S <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_i^n S_i \times SN_i$ [ $S_i$ (ha) : sowing amount by crop type (i), $SN_i$ (%) : nutrient content by crop type (i)]
N7)	Irrigation water (IW <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$A_{rice} \times 0.3 m \times 4 \times IWC$ [ $A_{rice}$ (ha) : rice cultivation area, $IWC$ (%) : nutrient content of irrigation water]
N8)	Total nutrient input (TN <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	N1 + N2 + N3 + N4 + N5 + N6 + N7

**Table 3.** Equations for calculation of nutrient output amount.

Nutrient output		Equations
N9)	Crop production (CP <sub>output</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_i^n CP_i \times CPN_i$ [ $CP_i$ (kg yr <sup>-1</sup> ) : crop production by crop type (i), $CPN_i$ (%) : nutrient content by crop type (i)]
N10)	Crop byproduct (CB <sub>output</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_i^n CP_i \times B_i \times BC_i$ [ $CP_i$ (kg yr <sup>-1</sup> ) : crop production by crop type (i), $B_i$ (%) : crop byproduct production coefficient by crop type (i), $BC_i$ (%) : nutrient content by crop byproduct type (i)]
N11)	Atmospheric outflow (VD <sub>output</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	$\sum_i^n (FS_i \times FV_i) + \sum_j^n (A_j \times DN_j)$ [ $FS_i$ (kg yr <sup>-1</sup> ) : supply by fertilizer type (i), $FV_i$ (%) : ammonium nitrogen volatilization rate by fertilizer type (i), $A_j$ (ha) : cultivation area by crop type (j), $DN_j$ (kg yr <sup>-1</sup> ) : N <sub>2</sub> O-N emission amount by crop type (j)]
N12)	Water system outflow (WP <sub>output</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	N8 - N9 - N10 - N11
N13)	Total nutrient output (TN <sub>input</sub> , kg yr <sup>-1</sup> )	N1 + N2 + N3 + N4 + N5 + N6 + N7

**지역단위 양분수지 지표 관리목표 도출 방법론** 본 연구에서 지역단위 양분수지 관리를 위한 양분수지 지표는 순양분수지 (net nutrient balance)를 지표로 설정하였으며, 양분수지 지표 관리과정에서 수계 양분유출 저감과 농업 생산성에 저하 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 양분수지 지표 관리목표 도출을 위한 방법론을 개발하고자 하였다. 지역단위 양분수지 지표 관리목표 도출을 위한 방법론은 지역단위 양분부하 변동에 따른 양분수지 지표와 작물생산의 변동의 수치적 모사를 통해 도출하였으며, 이를 위하여 아래와 같이 3가지 가정을 설정하였다. 가정 ① 양분부하 변동은 무기질 비료(화학비료), 부속유기질 비료(가축분뇨 퇴·액비), 유기질 비료(유박비료 등)의 투입량 변동에 의해서만 일어난다. 즉, 일반적인 농업활동을 고려할 때, 연간 지역의 양분부하 변동은 작물 시비를 위한 비료성분의 투입에 의해서만 일어나고, 다른 양분투입 인자(생물학적 질소고정, 종자 및 종묘, 대기강하물, 관개수)는 양분부하 변동에 영향을 주지 않는다고 가정하였다. 가정 ② 지역의 농경지 양분부하는 지역의 작물양분 시비부하와 동일하다. 즉, 지역의 양분부하는 작물의 작물시비기준 양분투입량 대비 농경지 투입 양분량의 비율을 의미하므로 지역의 양분부하와 농경지의 시비부하는 동일한 것으로 가정하였다. 가정 ③ 작물 양분시비에 따른 작물의 수량반응 특성은 지역에 상관없이 일정하다. 즉, 작물의 시비량 증가에 따른 수량반응(생산수량)은 지역에 따라 상이하지만, 작물의 시비량 증가에 따른 수량반응 형태(최대수량 반응 시비부하, 시비부하에 따른 수량증가 및 감소율 등)는 지역에 상관없이 동일하다고 가정하였다. 가정 ④ 비료시비에 따른 작물의 수량반응은 화분과 작물의 경우 2차함수 모델 (quadratic function model)을 따르고, 이외의 작물은 지수함수 모델 (exponential function model)을 따른다. 즉, 벼와 같은 화분과 작물은 작물의 시비량 증가와 함께 작물의 수량반응이 증가하고, 적정 시비량을 초과하는 경우 작물의 수량반응이 감소하는 특성을 가지며, 밭작물의 경우 작물의 시비량 증가와 함께 작물의 수량반응이 증가하고, 적정시비량을 초과하는 경우 작물수량 반응 증가가 일어나지 않는 것으로 가정하였다.

위의 4가지 가정에 기초하여 지역단위 양분수지 지표의 관리목표 도출 방법론을 도출하였으며, “가정 ①”에 따라 양분부하 변동에 따른 양분수지 수치모사에서 양분부하 변동에 따른 작물생산에 의한 양분유출을 모사함으로써 지역 단위 양분수지 수치모사가 가능하였다. 따라서 양분부하 변동에 따른 작물생산 양분유출 모사를 위해 “가정 ②”에 기초하여 Eq. 4로 정의하였다.

$$\text{지역 양분부하} = \frac{\text{농경지 양분 유입량 (B)}}{\text{농경지 양분 요구량 (C)}} = \text{농경지 시비부하} \quad (\text{Eq. 4})$$

또한, 가정 ③, ④에 기초하여 농경지 양분부하 변동에 따른 작물생산 수량반응은 화분과 작물의 경우 Eq. 5를 화분과 이외의 작물에 대해서는 Eq. 6을 적용하였다. 작물별 작물생산 수량반응 함수식의 계수는 작물별 시비반응 시험연구 자료 (Table 4)에 기초하여 도출하였다.

$$f_i(N_i) = a_i N_i^2 + b_i N_i + c_i \quad (\text{quadratic model, 곡류 작물}) \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서,  $f_i(N_i)$ 는 단위면적당 질소비료 시비반응 함수 ( $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$ )이며,  $a_i, b_i, c_i$ : 화분과 작물별 시비반응 함수의 계수를 의미한다.

**Table 4.** Reference inventory for the establishment of crops yield response function.

		Crops	References	
Food crops	Rice	Rice (paddy & upland)	Jeonbuk ARES (2004), RDA (2009a)	
	Barley	Common barley	Jeonbuk ARES (2003), Jeju ARES (2009)	
		Naked barley		
	Potatoes	Wheat	Gyeongbuk ARES (1979b)	
		White potatoes	Jeonnam ARES (1970)	
	Miscellaneous grains	Sweet potatoes	Jeju ARES (1977)	
		Corns	RDA (1979)	
		Buck wheat	RDA (1969), Gangwon ARES (1978), RDA (1997a)	
	Pulses	Soybeans	Gyeonggi ARES (1998)	
		Red beans	RDA (2017)	
		Green beans	Gyeongnam ARES (1989)	
	Orchards	Apples	RDA (1968)	
		Asian pears	-	
		Peaches	RDA (1970a), RDA (1987)	
		Grapes	RDA (1970b)	
Persimmon		RDA (1971b), Gyeongbuk ARES (2004)		
Plums		-		
Vegetables	Fruit-bearing vegetables	Field & greenhouse	Cucumbers	Gangwon ARES (1993)
		Pumpkins	-	
		Melons (chamwei)	RDA (2009b), Jung et al. (2010)	
		Water melons	RDA (2009b)	
	Leafy and stem vegetables	Field & greenhouse	Strawberries	Chungnam ARES (2002)
			Chinese cabbage	Kwak et al. (1997), RDA (2000)
			Spinach	-
	Root vegetables	Field & greenhouse	Lettuce	Gyeonggi ARES (1995)
			Cabbage	Gyeonggi ARES (1989)
			White radishes	Chungnam ARES (2000)
	Spice & culinary vegetables	Field & greenhouse	Carrots	Gyeonggi ARES (1979)
			Red peppers	Gyeongbuk ARES (1979a), Chungbuk ARES (2005)
Garlic			Chungnam ARES (1988)	
Ginger			Jeonbuk ARES (1977)	
Onions			RDA (1971a)	
Specialty crops		Green onions	Chungnam ARES (1981)	
		Sesame	Chungbuk ARES (1974), Jeju ARES (1982)	
		Perilla seeds	RDA (1997b)	
		Peanuts	RDA (1981)	

$$f_i(N_i) = a_i + b_i \exp(c_i N_i) \text{ (exponential model, 서류, 두류, 채소, 과수 등)} \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서,  $f_i(N_i)$  : 단위면적당 질소비료 시비반응 함수 ( $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$ )이며,  $a_i, b_i, c_i$  : 화분과 이외의 작물별 시비반응함수의 계수를 의미한다.

지역별로 양분부하(시비부하) 변동에 따른 작물별 시비반응 함수는 지역의 양분부하(시비부하)에서의 작물별 생산량( $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$ )을 초기 입력수치로 하여 작물별 시비반응 지역 최적화 함수를 구하였으며, 작물별 시비반응 지역 최적화 함수는 Eq. 7과 Eq. 8과 같다.

$$f_i(L_{N_j}) = a_{(i,j)}L_{N_j}^2 + b_{(i,j)}L_{N_j} + c_{(i,j)} \quad (\text{quadratic model, 곡류 작물}) \quad (\text{Eq. 7})$$

여기서,  $f_i(L_{N_j})$ 는 화분과 작물에 대한 지역별 (j) 단위면적당 질소비료 시비반응 최적화 함수이며,  $L_{N_j}$ 는 지역별 (j) 질소 양분부하이고,  $a_{(i,j)}$ ,  $b_{(i,j)}$ ,  $c_{(i,j)}$ 는 지역별 (j) 작물별 (i) 최적화 시비반응 함수의 계수이다.

$$f_i(L_{N_j}) = a_{(i,j)} + b_{(i,j)}\exp(c_{(i,j)}L_{N_j}) \quad (\text{exponential model, 서류, 두류, 채소, 과수 등}) \quad (\text{Eq. 8})$$

여기서,  $f_i(L_{N_j})$ 는 화분과 이외의 작물에 대한 지역별 (j) 단위면적당 질소비료 시비반응 최적화 함수이며,  $L_{N_j}$ 는 지역별 (j) 질소 양분부하이고,  $a_{(i,j)}$ ,  $b_{(i,j)}$ ,  $c_{(i,j)}$ 는 지역별 (j) 작물별 (i) 최적화 시비반응 함수의 계수이다.

마지막으로 지역별 양분부하 변동에 따른 작물생산에 의한 질소 양분유출량은 Eq. 9와 같이 산출하였으며, 지역별 양분부하 변동에 따른 작물 부산물에 의한 질소 양분유출량은 Eq. 10과 같이 산출하였다.

$$CP(L_{N_j}) = \sum_i^n f_i(L_{N_j})C_{N_i} \quad (\text{Eq. 9})$$

여기서,  $CP(L_{N_j})$ 는 지역별 (j) 질소 양분부하 변동에 따른 작물생산에 의한 질소 유출량( $\text{kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) 추정 함수이고,  $L_{N_j}$ 는 해당지역 (j)에서의 질소 양분부하(시비부하) ( $L_{N_j} > 0$ )이며,  $C_{N_i}$ 는 작물별 (i) 질소성분 함량 (%)이다.

$$CB(L_{N_j}) = \sum_i^n f_i(L_{N_j})B_{N_i}CB_{N_i} \quad (\text{Eq. 10})$$

여기서,  $CB(L_{N_j})$ 는 지역별 (j) 질소 양분부하 변동에 따른 작물부산물 생산에 의한 질소 양분 유출량( $\text{kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) 추정 함수이고,  $L_{N_j}$ 는 해당지역 (j)에서의 질소 양분부하(시비부하) ( $L_{N_j} > 0$ )이며,  $B_{N_i}$ 는 작물별 (i) 부산물 발생 비율이고,  $CB_{N_i}$ 는 작물부산물별 질소성분 함량 (%)이다.

지역단위 양분수지 지표 관리목표는 Eq. 9와 Eq. 10을 2차함수 (quadratic model)로 다시 최적화 하여 Eq. 11, Eq. 12와 같이 지역별 작물 표준화 질소 유출량(작물생산 질소 유출)과 지역별 작물부산물 표준화 질소유출량(작물부산물 질소 유출) 추정 함수를 구하였고, Eq. 11을 1차 미분하여 작물생산에 의한 질소 유출이 최대가 되는 질소부하(순 질소수지) 지점을 양분관리 목표 지표로 설정하였다.

$$CP(L_{N_j}) = \sum_i^n f_i(L_{N_j})C_{N_i} = a'_{(i,j)}L_{N_j}^2 + b'_{(i,j)}L_{N_j} + c'_{(i,j)} \quad (\text{Eq. 11})$$



여기서,  $L_{Nj}$ 는 지역별 (j) 질소 양분부하이고,  $a'_{(i,j)}$ ,  $b'_{(i,j)}$ ,  $c'_{(i,j)}$ 는 지역별 (j) 작물별 (i) 표준화 작물생산에 의한 질소 유출 함수의 계수이다.

$$CB(L_{Nj}) = \sum_i^n f_i(L_{Nj}) B_{N_i} CB_{N_i} = a'_{(i,j)} L_{Nj}^2 + b'_{(i,j)} L_{Nj} + c'_{(i,j)} \quad (\text{Eq. 12})$$

여기서,  $L_{Nj}$ 는 지역별 (j) 질소 양분부하이고,  $a'_{(i,j)}$ ,  $b'_{(i,j)}$ ,  $c'_{(i,j)}$ 는 지역별 (j) 작물별 (i) 표준화 작물부산물 생산에 의한 질소 유출 함수의 계수이다.

최종적으로 지역별 양분수지 관리 목표지표 도출을 위하여 지역별 양분부하-양분수지 변동 관계를 도출하였다. 지역의 질소 양분부하 변동에 따른 양분유입 항목 중에서 가축분뇨 퇴·액비, 무기질비료, 유기질비료의 유입량은 지역의 질소 양분부하 변동과 비례하여 정량적으로 변동시켰으며, 기타 질소 양분유입 항목인 생물학적 질소고정, 종자 및 종묘, 대기강하물, 관개수는 비료 투입량과 관계없는 농업생산 활동 및 환경 인자로서 양분부하 변동과 관계없이 변동하지 않는 것으로 간주하였다. 질소 양분유출 항목에서 작물생산과 작물부산물 항목은 Eq. 9와 Eq. 10을 통해 산출하였으며, 질소양분의 대기유출은 가축분뇨 퇴·액비, 무기질비료, 유기질비료의 유입량에 따른 종속변수로서 Table 3의 N11)의 방법론에 따라 산출하였다.

**분석자료** 지역단위 양분수지와 양분부하 분석을 위한 통계자료는 2017년도를 기준년도로 하였으며, 무기질비료는 농림축산식품통계연보 (MAFRA, 2018)를 사용하였으며, 가축사육두수는 가축동향조사 (MAFRA, 2018), 유기질비료는 비료사업통계 (NACF, 2017)를 사용하였다. 기타 양분의 유입 유출 항목의 산출을 위한 통계자료 및 조정 계수는 ME·MAFRA (2016)의 보고서 자료에 근거하여 산출하였다. 또한 작물별 작물생산 수량반응 함수식의 계수는 작물별 시비반응 시험연구 자료 (Table 4)에 기초하여 분석하였다.

## Results and Discussion

**양분수지 분석** 지역단위 (도 단위) 질소 양분부하와 양분유입 항목별 농경지의 질소 유입량은 Table 5와 같다. 국가 질소 양분유입은 가축분뇨 퇴·액비가 34.5% (83.4 kg-N ha<sup>-1</sup>), 무기질비료가 43.6% (105.5 kg-N ha<sup>-1</sup>), 유기질비료가 9.1% (22.1 kg-N ha<sup>-1</sup>)를 차지하는 것으로 나타났으며, 국가 질소 양분유출은 작물생산이 20.7% (50.1 kg-N ha<sup>-1</sup>), 작물부산물이 15.9% (38.3 kg-N ha<sup>-1</sup>), 대기유출이 11.7% (28.2 kg-N ha<sup>-1</sup>), 수계유출이 51.8% (125.2 kg-N ha<sup>-1</sup>)로 나타나 양분유출 항목에서 수계로 유출되는 질소양분의 잠재량이 가장 큰 비중을 차지하였다. 경기도의 경우 질소 양분유입은 가축분뇨 퇴·액비가 53.2% (170.2 kg-N ha<sup>-1</sup>), 무기질비료가 31.4% (100.5 kg-N ha<sup>-1</sup>), 유기질비료가 5.2% (16.5 kg-N ha<sup>-1</sup>)로 전국에서 가축분뇨 퇴·액비에서 유래하는 질소 양분유입이 가장 큰 지역이었으며, 질소 양분유출은 작물생산 14.3% (45.8 kg-N ha<sup>-1</sup>)로 전국에서 가장 낮은 질소 양분 이용효율을 보였으며, 수계유출은 60.5% (193.6 kg-N ha<sup>-1</sup>)로 가장 큰 수계유출 잠재량을 보였다. 경기도 양분 현황과는 대조적으로 제주도의 경우, 질소 양분유입에서 가축분뇨 퇴·액비가 17.6% (47.0 kg-N ha<sup>-1</sup>), 무기질비료가 60.1% (160.1 kg-N ha<sup>-1</sup>), 유기질비료가 12.7% (33.9 kg-N ha<sup>-1</sup>)로 무기질비료로 인한 질소 양분유입이 가장 큰 것으로 나타났으며, 질소 양분유출에서 작물 생산이 16.1% (43.0 kg-N ha<sup>-1</sup>), 수계유출이 67.6% (180.2 kg-N ha<sup>-1</sup>)로 전국에서 가장 큰 질소양분의 수계유출 비중

을 나타내었다. 따라서 지역별 양분수지 현황 특성을 살펴볼 때, 경기도의 경우 가축분뇨 퇴·액비 사용에서 기인하는 수계유출 양분의 관리가 중요한 과제였으며, 제주도의 경우 무기질비료 사용에서 기인하는 수계유출 양분의 관리가 중요한 것으로 평가되었다.

**Table 5.** Nitrogen input in croplands (2017).

Province	Nitrogen loading rate	Livestock fertilizer	Inorganic fertilizer	Organic fertilizer	Biological nitrogen fixation	Seed & plant	Atmospheric deposition	Irrigation water	Sum
----- kg-N ha <sup>-1</sup> (%) -----									
Nation	1.73	83.4 (34.5)	105.5 (43.6)	22.1 (9.1)	1.0 (0.4)	1.7 (0.7)	23.2 (9.6)	5.0 (2.1)	241.9 (100.0)
Gyeong-gi	2.34	170.2 (53.2)	100.5 (31.4)	16.5 (5.2)	0.9 (0.3)	1.9 (0.6)	23.2 (7.3)	7.0 (2.2)	320.0 (100.0)
Gang-won	1.54	67.0 (26.0)	131.2 (51.0)	31.1 (12.1)	1.3 (0.5)	1.5 (0.6)	23.2 (9.0)	2.0 (0.8)	257.3 (100.0)
Chung-buk	1.70	76.9 (32.4)	100.7 (42.5)	29.8 (12.6)	1.9 (0.8)	1.3 (0.6)	23.2 (9.8)	3.4 (1.4)	237.1 (100.0)
Chung-nam	2.06	107.1 (39.7)	112.6 (41.8)	14.7 (5.5)	0.8 (0.3)	2.2 (0.8)	23.2 (8.6)	9.0 (3.3)	269.5 (100.0)
Jeon-buk	1.83	79.3 (35.2)	103.5 (46.0)	12.2 (5.4)	1.0 (0.4)	2.0 (0.9)	23.2 (10.3)	3.9 (1.7)	225.1 (100.0)
Jeon-nam	1.79	53.7 (25.5)	107.4 (51.1)	17.8 (8.5)	1.3 (0.6)	1.9 (0.9)	23.2 (11.0)	5.1 (2.4)	210.4 (100.0)
Gyeong-buk	1.68	74.2 (33.4)	83.5 (37.5)	37.1 (16.7)	1.1 (0.5)	1.3 (0.6)	23.2 (10.4)	2.0 (0.9)	222.5 (100.0)
Gyeong-nam	1.42	66.4 (30.7)	101.3 (46.7)	19.8 (9.1)	0.8 (0.4)	1.6 (0.7)	23.2 (10.7)	3.6 (1.7)	216.7 (100.0)
Jeju	1.26	47.0 (17.6)	160.1 (60.1)	33.9 (12.7)	1.7 (0.6)	0.5 (0.2)	23.2 (8.7)	0.0 (0.0)	266.4 (100.0)

또한, 국가 질소 양분부하는 1.73이었으며, 경기도 2.34, 충청남도 2.06, 전라북도 1.83, 전라남도 1.79, 충청북도 1.70, 경상북도 1.68, 강원도 1.54, 경상남도 1.42, 제주도 1.26의 순으로 나타났다. 국가 순질소수지 (NNB)는 125.2 kg-N ha<sup>-1</sup>이었으며, 경기도 193.6, 제주도 180.2, 강원도 144.0, 충청북도 134.8, 충청남도 131.5, 전라북도 101.9, 경상북도 106.4, 전라남도 100.8, 경상남도 82.2 kg-N ha<sup>-1</sup>의 순으로 나타나 지역단위 질소 양분부하 순위와 양분수지 순위는 일치하지 않는 것으로 나타났다. 특히 제주도의 경우, 질소 양분부하는 1.26으로 전국에서 가장 낮으나 수계유출 잠재량을 나타내는 순질소수지는 180.2 kg-N ha<sup>-1</sup>으로 경기도에 이어 전국에서 두 번째로 높게 나타났다. Lee and Yoon (2019)은 농경지 양분관리를 위한 양분수지 지표와 양분부하 지표간의 비교 연구에서 질소 양분의 경우 양분부하와 순양분수지가 일치하지 않는다고 보고한 바 있으며, 지역별 양분부하와 양분수지의 순서가 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 기인한다고 하였다.

**지역별 작물 수량반응 표준화 함수** 본 연구에서는 지역단위 양분수지 관리지표 도출을 위하여 지역의 양분 부하 변동에 따른 양분수지 변동을 모사하였으며, 이를 위하여 지역의 양분부하 변동에 따른 작물의 수량반응 및 작물 부산물 표준화 함수(Eq. 11, Eq. 12)를 도출하였다. 지역별 양분부하 변동에 따른 작물의 수량반응 표준화 함수 도출을 위하여 Eq. 4에서 Eq. 10의 방법론에 따라 지역별 시비부하 대비 작물의 수량반응을 추정된 결과는 Supplementary Table 1에서 Table 10과 같다. Supplementary Table 1에서 Table 10에서는 지역의 양분부하 증감에 따라 가축분뇨 퇴·액비, 무기질비료, 유기질비료의 투입량을 비례하여 증감시켰으며, 지역별 작물 생산 현황자료를 기초로 하여 지역별 작물별 수량반응곡선을 도출하여 양분부하 변동에 따른 지역 내 작물의 생산량 변동을 산출하였다. Supplementary Table 1에서 Table 10에서 산출한 양분부하 변동에 따른 작물 및 작물부산물 질소유출량은 각각 Eq. 11과 Eq. 12에 따라 이차함수(quadratic function)으로 최적화 하여 지역별 작물 및 작물부산물 생산으로 인한 질소 양분유출을 산출하는 표준화 함수로 사용하였다(Fig. 2). 지역별 작물 수량반응 표준화 함수의 정확도를 판단하기 위하여 양분수지 분석을 통해 산출한 지역별 작물생산 질소 양분유출(Table 6의 Crop production 항목)과 지역별 시비부하 대비 작물의 수량반응 표준화 함수(Fig. 2)를 적용하여 추산한 지역별 작물생산 질소 양분유출 간의 상관관계를 분석한 결과 Fig. 3과 같이 99% 유의수준에서 높은 상관관계( $r^2 = 0.9990^{***}$ ) 보였다. 따라서 본 연구에서 개발한 지역별 시비부하 대비 작물의 수량반응 표준화 함수는 통계적으로 유의성이 있는 작물 수량반응을 추산하는 것으로 평가되었다.

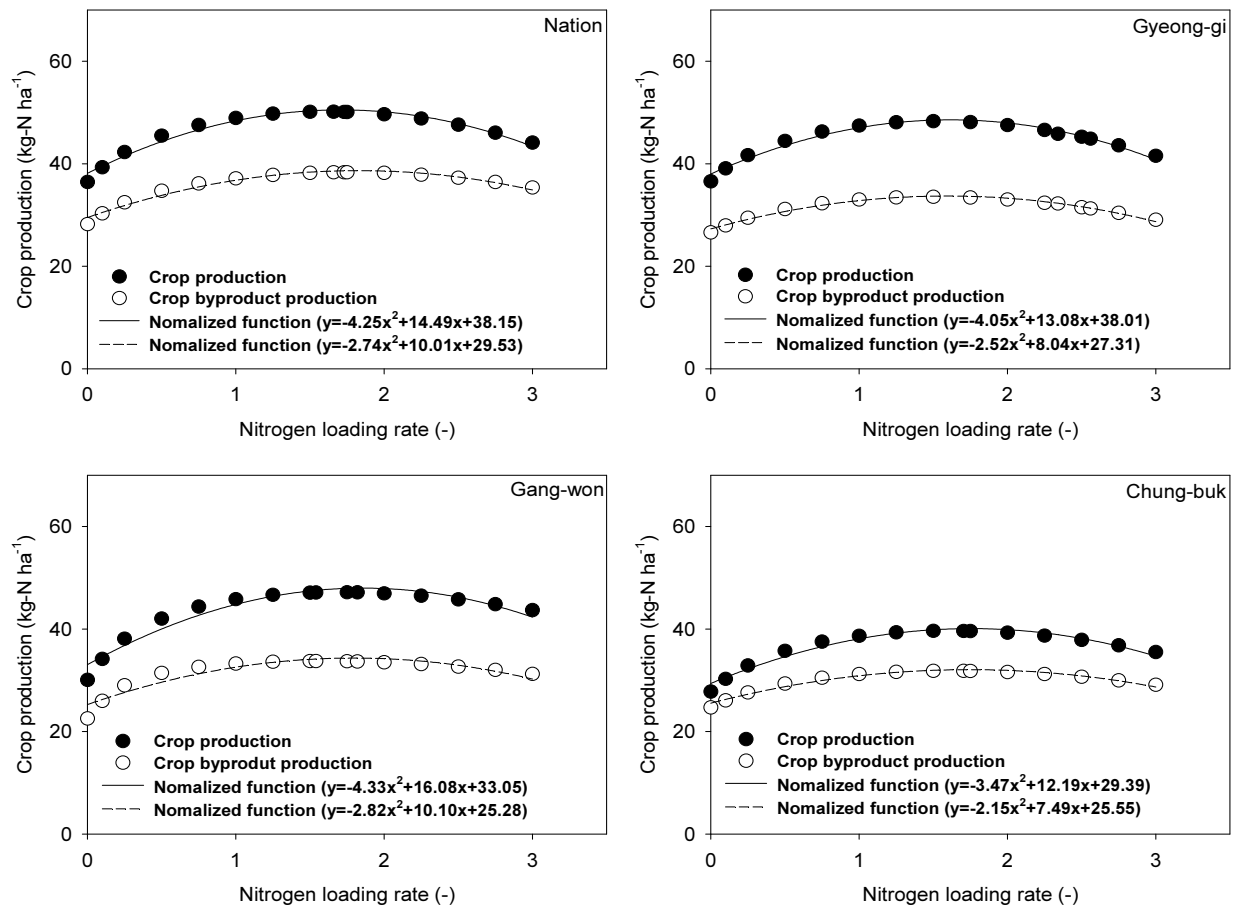


Fig. 2. Regional normalized crop and byproduct production function by Eq. 11, Eq. 12.

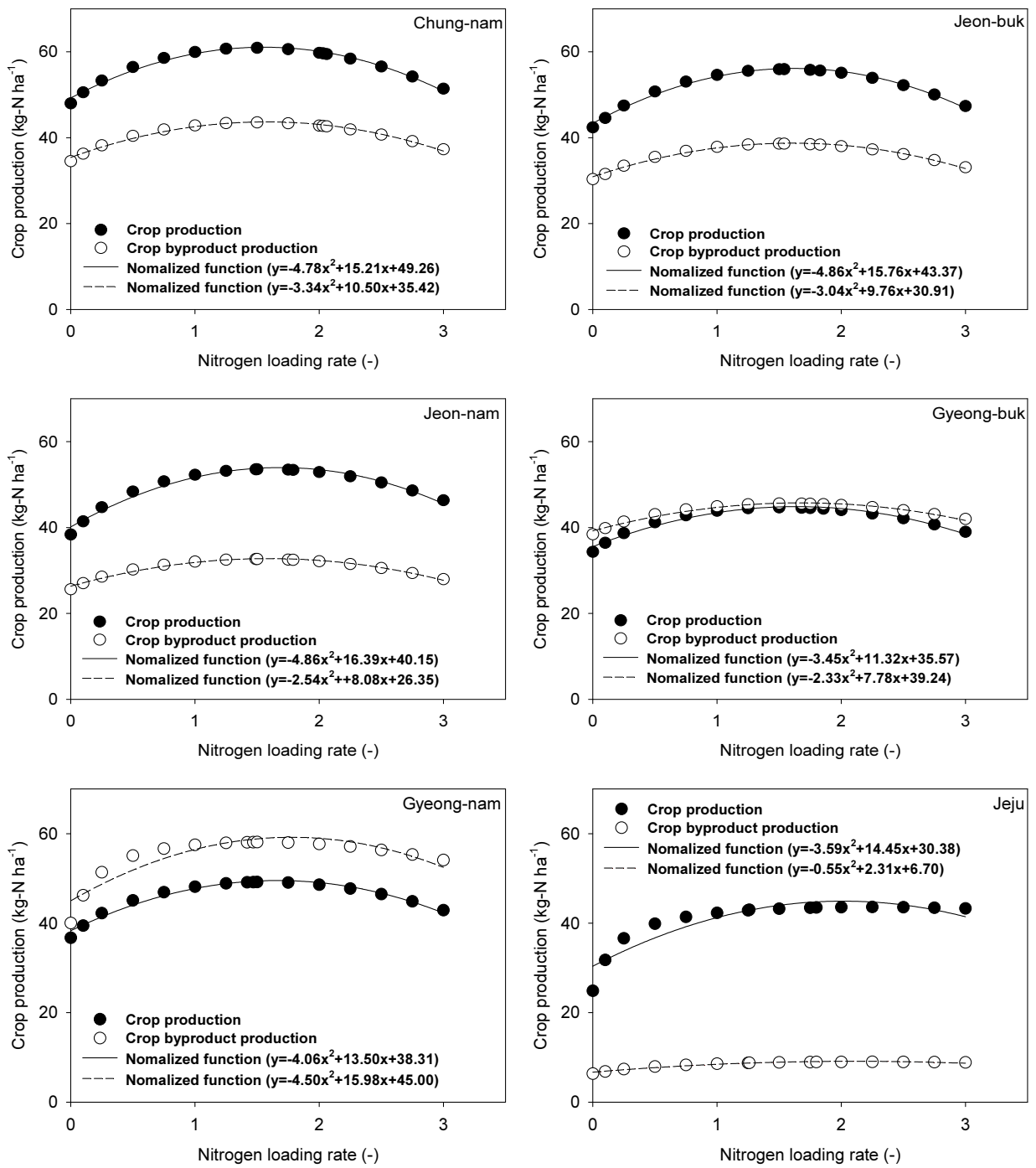
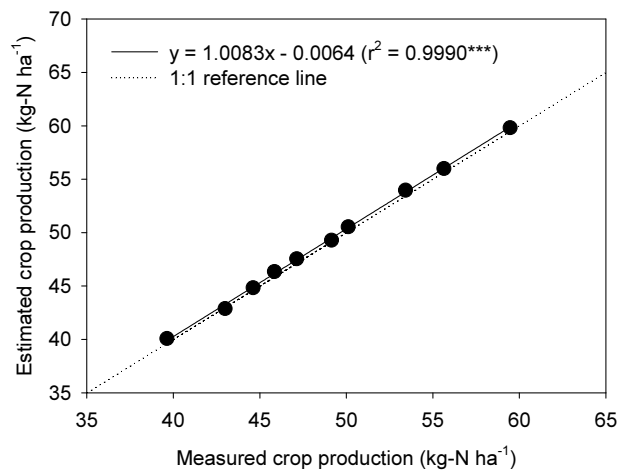


Fig. 2. Regional normalized crop and byproduct production function by Eq. 11, Eq. 12. (Continued)

**Table 6.** Nitrogen output in croplands (2017).

Province	Nitrogen loading rate	Crop production	Crop byproduct	kg-N ha <sup>-1</sup> (%)		Sum
				Atmospheric outflow	Water system outflow	
Nation	1.73	50.1 (20.7)	38.3 (15.9)	28.2 (11.7)	125.2 (51.8)	241.9 (100.0)
Gyeong-gi	2.34	45.8 (14.3)	32.3 (10.1)	48.3 (15.1)	193.6 (60.5)	320.0 (100.0)
Gang-won	1.54	47.1 (18.3)	33.8 (13.1)	32.4 (12.6)	144.0 (56.0)	257.3 (100.0)
Chung-buk	1.7	39.6 (16.7)	31.8 (13.4)	30.9 (13.0)	134.8 (56.8)	237.1 (100.0)
Chung-nam	2.06	59.5 (22.1)	42.6 (15.8)	35.9 (13.3)	131.5 (48.8)	269.5 (100.0)
Jeon-buk	1.83	55.6 (24.7)	38.4 (17.1)	29.2 (13.0)	101.9 (45.3)	225.1 (100.0)
Jeon-nam	1.79	53.4 (25.4)	32.5 (15.4)	23.7 (11.3)	100.8 (47.9)	210.4 (100.0)
Gyeong-buk	1.68	44.6 (20.1)	45.6 (20.4)	25.8 (11.6)	106.4 (47.8)	222.5 (100.0)
Gyeong-nam	1.42	49.1 (22.7)	58.1 (26.8)	27.3 (12.6)	82.2 (37.9)	216.7 (100.0)
Jeju	1.26	43.0 (16.1)	8.8 (3.3)	34.5 (12.9)	180.2 (67.6)	266.4 (100.0)



**Fig. 3.** Linear regression curve between measured and estimated crop production.

**지역단위 양분수지 관리 목표지표** 본 연구에서 지역단위 양분수지 관리를 위한 양분수지 관리 목표지표 도출의 개념도는 Fig. 4와 같다. 작물의 최대수량 반응을 나타내는 질소 양분부하 수준 (L1)을 초과하는 구간에서는 과도한 양분으로 인하여 작물의 생산성이 낮아짐과 동시에 질소양분의 수계유출 잠재량이 크게 증가하는 특성이 있다. 작물의 최대수량 반응을 나타내는 질소 양분부하 수준 (L1) 미만의 구간에서는 질소 양분부하 감소는 작물의 생산성이

낮아짐과 동시에 질소양분 수계유출의 완만한 감소를 나타낸다. 따라서 최대 작물 수량반응을 나타내는 질소 양분부하 수준은 작물의 생산성을 저하시키지 않으면서 질소 양분의 수계유출을 최소화시킬 수 있는 지역 양분관리의 1차적인 목표 지점이 될 수 있다. 이러한 양분수지 관리 목표지표 도출 개념에 근거하여 표준화 작물 시비반응 함수(Eq. 11)를 이용하여 최대 작물수량 반응을 나타내는 양분부하 수준과 순양분수지 지표를 산출한 결과 Table 7과 같다. 2017년을 기준으로 국가 질소 양분부하는 1.73, 표준화 순질소수지는 124.47 kg-N ha<sup>-1</sup>, 표준화 작물생산 질소양분 유출은 50.51 kg-N ha<sup>-1</sup>이었으며, 작물 최대수량 반응을 나타내는 국가 질소 양분부하는 1.71, 표준화 순질소수지는 121.94 kg-N ha<sup>-1</sup>, 표준화 작물생산 질소양분 유출은 50.51 kg-N ha<sup>-1</sup>이었다. 따라서 국가 질소수지의 적정 관리를 위해서는 양분부하는 약 0.02 저감이 요구되며, 이때 질소 양분의 수계유출 잠재량은 약 2.53 kg-N ha<sup>-1</sup>만큼 감소하고, 작물생산성은 약 0.002 kg-N ha<sup>-1</sup>만큼 증가하는 것으로 평가되었다. 지역별 양분수지 지표 분석에서 경기도, 충청남도, 전라

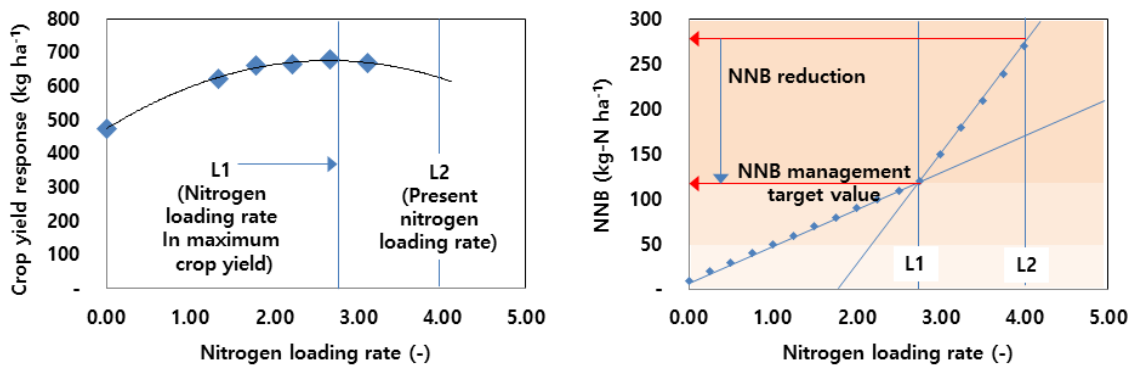


Fig. 4. Conceptual diagram of derivation of nutrient balance management index.

Table 7. Derivation of target index for regional nutrient balance management using normalized crop and byproduct function.

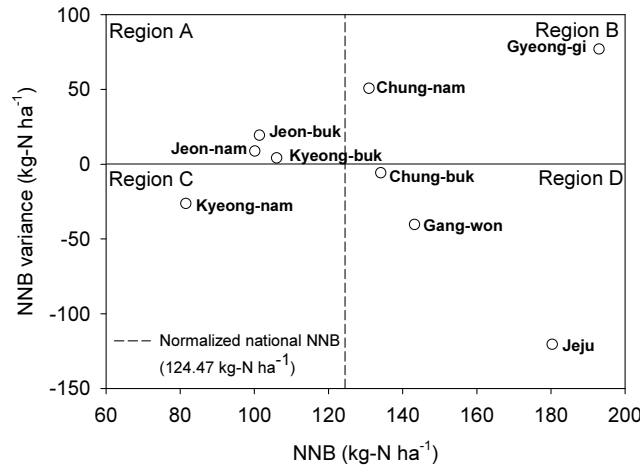
Province	Normalized nitrogen level (2017)			Normalized nitrogen level presenting the maximum crop yield response					
	Nitrogen loading rate (A)	Net nitrogen balance <sup>†</sup> (B)	Crop production (C)	Nitrogen loading rate		Net nitrogen balance		Crop production	
				Value (D)	Variance (A-D)	Value (E)	Variance (B-E)	Value (F)	Variance (C-F)
		----- kg-N ha <sup>-1</sup> -----				---- kg-N ha <sup>-1</sup> ----		----- kg-N ha <sup>-1</sup> -----	
Nation	1.73	124.47	50.51	1.71	0.02	121.94	2.53	50.51	-0.002
Gyeong-gi	2.34	192.96	46.45	1.62	0.72	115.93	77.03	48.58	-2.13
Gang-won	1.54	143.19	47.56	1.86	-0.32	183.48	-40.29	47.99	-0.44
Chung-buk	1.70	134.10	40.08	1.76	-0.06	139.82	-5.72	40.09	-0.01
Chung-nam	2.06	130.90	59.82	1.55	0.51	80.12	50.77	61.08	-1.25
Jeon-buk	1.83	101.37	55.93	1.62	0.21	81.97	19.40	56.14	-0.21
Jeon-nam	1.79	100.12	53.91	1.69	0.10	91.29	8.83	53.97	-0.05
Gyeong-buk	1.68	106.02	44.84	1.64	0.04	101.81	4.21	44.85	-0.01
Gyeong-nam	1.42	81.51	49.29	1.66	-0.24	107.77	-26.26	49.53	-0.24
Jeju	1.26	180.32	42.89	2.01	-0.75	300.82	-120.50	44.93	-2.04

<sup>†</sup> Net nitrogen balance = Nitrogen input - Crop production - Atmospheric outflow = Water system outflow.

남도, 전라북도, 경상북도는 질소 양분부하 수준이 작물 최대수량 반응을 나타내는 양분부하 수준을 초과하였으며, 강원도, 충청북도, 경상남도, 제주도는 질소 양분부하 수준이 작물 최대수량 반응을 나타내는 양분부하 수준에 미치지 못하는 것으로 평가되었다.

가장 높은 질소 양분부하를 보이는 경기도의 경우 질소 양분부하는 2.34, 표준화 순질소수지는 192.96 kg-N ha<sup>-1</sup>, 표준화 작물생산 질소 양분유출은 46.45 kg-N ha<sup>-1</sup>이었으며, 작물 최대수량 반응을 나타내는 질소 양분부하는 1.62, 표준화 순질소수지는 115.93 kg-N ha<sup>-1</sup>, 표준화 작물생산 질소양분 유출은 48.58 kg-N ha<sup>-1</sup>로 나타났다. 따라서 경기도는 작물 최대수량 반응을 나타내는 질소 양분부하 수준으로 양분유입을 저감시키는 경우, 양분부하는 0.74 만큼 저감되고, 이때 질소 양분의 수계유출 잠재량 77.03 kg-N ha<sup>-1</sup>만큼 감소되는 것으로 나타났으며, 작물생산량은 2.13 kg-N ha<sup>-1</sup>만큼 증가가 예상되었다. 제주도는 낮은 질소 양분부하 (1.26)를 보이면서 높은 표준화 수계유출 잠재량 (180.32 kg-N ha<sup>-1</sup>)을 나타내는 지역이다. 제주도의 경우, 작물 최대수량 반응을 나타내는 질소 양분부하 수준은 2.01로서 농경지 양분부하 (1.26)보다 높아, 추가적인 양분유입이 가능한 것으로 분석되었다. 그러나 질소 양분부하 2.01에서 제주도의 질소 양분의 표준화 수계유출 잠재량은 300.82 kg-N ha<sup>-1</sup>까지 증가하였다. 제주도는 Table 5에 나타낸 바와 같이, 질소 양분유입에서 무기질비료가 60.1% (160.1 kg-N ha<sup>-1</sup>)을 차지하고 있어, 질소 양분의 수계유출잠재량의 많은 양이 무기질 비료에서 기인하는 특성이 있다는 점을 고려하면, 화학비료의 사용량 저감과 가축분뇨 퇴·액비화를 통한 경축순환농업의 활성화가 요구되는 지역으로 판단된다. Fig. 5는 Table 7의 표준화 질소수지를 기초로 하여 2017년 기준에서 현재 순질소수지와 적정양분관리를 위한 지역 양분수지 저감 목표량을 기준으로 도별 분포를 나타내었다. 표준화 국가 순질소수지는 125.17 kg-N ha<sup>-1</sup>로서 표준화 국가 순질소수지를 초과하는 지역은 경기도, 제주도, 강원도, 충청남도였으며, 표준화 국가 순질소수지에 미치지 않는 지역은 경상북도, 전라북도, 전라남도, 경상남도도 나타났다. 또한 지역 질소 양분관리를 위하여 순질소수지의 저감이 요구되는 지역은 경기도, 충청남도, 경상북도, 전라북도, 전라남도였으며, 제주도, 강원도, 충청북도, 경상남도는 질소 양분투입의 여유용량이 있는 것으로 나타났다. 또한, 현재 순질소수지와 적정양분관리를 위한 지역 양분수지 저감 목표량을 기준으로 지역의 양분관리 특성은 4개 지역으로 구분이 가능하였다. A 지역 (region A)은 현재 질소 양분의 수계유출잠재량이 작고, 지역의 적정 양분관리를 위하여 양분 저감이 요구되는 지역이며, 전라북도, 전라남도, 경상북도가 A 지역으로 분류되었다. B 지역 (region B)은 현재 질소 양분의 수계유출잠재량이 많고, 지역의 적정 양분관리를 위하여 양분 저감이 요구되는 지역으로 경기도, 충청남도가 B 지역으로 분류되었다. C 지역 (region C)은 현재 질소 양분의 수계유출잠재량이 작고, 질소 양분투입의 여유용량이 있어 양분저감 노력이 상대적으로 불필요한 지역이며, 경상남도가 C 지역으로 분류되었다. D 지역은 현재 질소 양분의 수계유출잠재량이 크나, 질소 양분투입의 여유용량이 있어 양분저감 노력이 상대적으로 불필요한 지역으로 제주도, 강원도, 충청북도가 D 지역으로 분류되었다. 본 연구에서 제주도는 매우 큰 질소 양분의 수계유출잠재량 (180.32 kg-N ha<sup>-1</sup>)을 나타내고 있으나 작물생산성 측면에서는 질소 양분투입의 여유용량을 나타내고 있어 육지지역과 다른 독특한 질소 양분수지 특성을 보였다. 제주도의 특이적인 양분수지 특성은 화산회토로 이루어진 제주도 토양의 특성에서 기인하는 것으로 판단된다. 제주지역의 화산회토는 주요한 점토광물이 allophane으로 이루어졌으며, 표토는 다량의 유기물을 함유하고 있어 (Park et al., 1984), 염기치환용량이 크고, 인산 흡착력이 커서 일반 육지 토양과 구별되는 특징을 가지고 있다 (Song and Yoo, 1991; Hur et al., 2006). 따라서 제주도 화산회토는 육지의 일반 토양에 비하여 유기물 함량과 양이온교환용량이 높아 양분을 보유하는 능력이 크다. 따라서 제주도의 경우, 질소 양분의 작물이용효율이 낮고, 토양에 축적되는 양분 비중이 높은 토양 특성으로 인하여 육지지역과 비교하여 작물

생산에 더 많은 양의 질소양분의 투입이 요구되는 것으로 판단된다. 지금까지 농경지 양분수지는 유입되는 양분과 유출되는 양분의 수지를 “0”으로 간주하여 양분수지 지표를 산출하였다. 그러나 위의 연구결과에 비추어 볼 때, 향후 지역의 양분수지 특성을 더욱 면밀히 파악하기 위해서는 유입양분 중 토양에 축적·고정되는 양분 ( $\Delta N$ -soil)의 거동 및 특성에 관한 연구가 요구되고 있다.



**Fig. 5.** Regional classification for regional nutrient balance management by NNB (NNB means net nitrogen balance, NNB variance means the difference between regional NNB and target NNB index for regional nutrient balance management).

## Conclusions

환경부는 농경지로 투입되는 양분 (질소, 인)의 투입량을 적정수준으로 관리하기 위하여 2021년을 목표연도로 지역단위 양분관리제도 도입을 추진하고 있다. 우리나라 양분수지는 질소 212 kg ha<sup>-1</sup>, 인 46 kg ha<sup>-1</sup>로 보고되고 있으며, 질소수지는 경제협력개발기구 가입국 중 1위, 인수지는 2위에 위치하고 있어 농업환경 보전과 지속가능한 농산업 기반 구축을 위하여 농경지 양분의 적정 관리가 시급한 상황이다. 농경지로 투입되는 양분의 투입원은 크게 무기질비료 (화학비료), 부숙유기질비료 (가축분뇨 퇴·액비), 유기질비료 (유박비료 등) 부문으로 구분할 수 있으며, 지역단위 양분관리제도 시행에 따라 양분 과다지역의 경우 농경지로 투입되는 양분의 투입이 크게 제한 될 수 있다. 특히, 우리나라는 가축분뇨의 처리에 있어 약 90%를 자원화 (퇴비, 액비) 처리하고 있어 가축사육 밀집지역의 경우, 농경지 양분투입의 제한이 가축사육두수 규제에 영향 등이 우려되고 있다. 따라서 양분 과다지역의 경우, 현재의 양분수준 보다는 지역의 적정 양분수지 관리를 위한 양분수지 관리 목표 설정 수준에 관심이 증가하고 있다. 그러나 지금까지 지역단위 양분수지 관련 연구는 지역의 양분수지 현황을 파악하는 양분수지 산출 방법론 개발에 집중하였으며, 지역 양분의 적정 관리를 위한 양분수지 관리목표를 설정하는 연구는 매우 미미한 상황이다. 농경지 투입양분은 토양의 비옥도를 향상시키고 작물의 생산성을 증대시키는 순기능을 가지고 있는 반면, 농경지 과다양분으로 인한 비점오염원 유출의 역기능을 함께 가지고 있다. 따라서 지역단위 양분수지 관리목표를 설정하는데 있어, 농경지 투입양분 저감으로 인한 비점오염원 저감이라는 환경적인 효과 측면과 농업 생산성 감소라는 농업생산 측면을 함께 고려할 필요가 있다. 지금까지는 지역단위 양분관리를 위한 관리목표 지표는 양분초과율 지표가 제안된 바 있다. 그러나 양분초과율 지표는 단



순히 농경지 양분요구량 대비 농경지 투입양분량의 비율로서 농경지로 투입되는 양분의 부하정도만을 나타낼 뿐, 양분의 수계유출잠재량, 농업생산성 저감 등의 농업 및 환경적인 측면에 대한 영향을 파악할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 과학적인 지역단위 양분관리를 위하여 지역의 양분부하 변동에 따른 지역별 작물생산 수량반응을 예측하였고, 이를 통해 농업생산에 영향을 주지 않는 지역의 적정 양분관리 목표를 설정하는 방법론을 구축하였으며, 이를 통하여 지역의 양분부하 관리가 농업생산과 양분의 수계유출에 미치는 영향의 파악이 가능하였다. 지역단위 양분수지 현황 분석과 양분수지 관리 목표 도출 방법론은 지역에서의 양분(질소, 인)의 물질순환 체계를 파악할 수 있다는 장점이 있었으며, 지역별 농업환경을 고려하여 적정 양분관리와 양분순환이용 등 합리적인 경축순환농업 모델을 도출하는 방법론으로 발전이 가능할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Smart Farm Innovation Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (Project No. 421046-03).

## Supplementary Information

Supplementary data are available at Korean Journal of Soil Science and Fertilizer online (<http://www.kjssf.org>).

## References

- Chungbuk ARES (Chungbuk Agricultural Research & Extension Services). 1974. Fertilization test on sesame. Chungbuk ARES Test Research Report. (in Korean)
- Chungbuk ARES (Chungbuk Agricultural Research & Extension Services). 2005. Demonstration test of nitrogen fertilization amount by upland soil type. Chungbuk ARES Test Research Report. (in Korean)
- Chungnam ARES (Chungnam Agricultural Research & Extension Services). 1981. Fertilization test on green onion. Chungnam ARES Test Research Report. (in Korean)
- Chungnam ARES (Chungnam Agricultural Research & Extension Services). 1988. Fertilization test on Namdo garlic. Chungnam ARES Test Research Report. (in Korean)
- Chungnam ARES (Chungnam Agricultural Research & Extension Services). 2000. Nitrogen fertilization standard test on Altari radish. Chungnam ARES Test Research Report. (in Korean)
- Chungnam ARES (Chungnam Agricultural Research & Extension Services). 2002. Appropriate fertilization amount test of strawberry in greenhouse. Chungnam ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gangwon ARES (Gangwon Agricultural Research & Extension Services). 1978. Buckwheat fertilization and planting density test. Gangwon ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gangwon ARES (Gangwon Agricultural Research & Extension Services). 1993. Appropriate fertilization amount test of cucumber cultivation by soil textures in greenhouse. Gangwon ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gyeongbuk ARES (Gyeongbuk Agricultural Research & Extension Services). 1979a. Fertilization test on new pepper variety. Gyeongbuk ARES Test Research Report. (in Korean)

- Gyeongbuk ARES (Gyeongbuk Agricultural Research & Extension Services). 1979b. Test on recommendation of suitable amount for wheat fertilization. Gyeongbuk ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gyeongbuk ARES (Gyeongbuk Agricultural Research & Extension Services). 2004. Test to establish fertilization system of persimmon. Gyeongbuk ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gyeonggi ARES (Gyeonggi Agricultural Research & Extension Services). 1979. Fertilization standard test on carrot. Gyeonggi ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gyeonggi ARES (Gyeonggi Agricultural Research & Extension Services). 1989. Planting density and fertilization test for summer cultivation of cabbage in flatland. Gyeonggi ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gyeonggi ARES (Gyeonggi Agricultural Research & Extension Services). 1995. Nitrogen fertilization standard test (preliminary) on lettuce and crown daisy in greenhouse. Gyeonggi ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gyeonggi ARES (Gyeonggi Agricultural Research & Extension Services). 1998. Research on field crop cultivation technology development. Gyeonggi ARES Test Research Report. (in Korean)
- Gyeongnam ARES (Gyeongnam Agricultural Research & Extension Services). 1989. Effect of nitrogen fertilization on growth and yield of green beans. Gyeongnam ARES Test Research Report. (in Korean)
- Hur, S.O., K.H. Moon, K.H. Jung, S.K. Ha, K.C. Song, H.C. Lim, and G.G. Kim. 2006. Estimation model for simplification and validation of soil water characteristics curve on volcanic ash soil in subtropical area in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39:329-333.
- Jeju ARES (Jeju Agricultural Research & Extension Services). 1977. Test on recommendation of suitable amount of sweet potato application. Jeju ARES Test Research Report. (in Korean)
- Jeju ARES (Jeju Agricultural Research & Extension Services). 1982. Fertilization test on sesame. Jeju ARES Test Research Report. (in Korean)
- Jeju ARES (Jeju Agricultural Research & Extension Services). 2009. Research on fertilization improvement to improve the quality of barley. Jeju ARES Test Research Report. (in Korean)
- Jeonbuk ARES (Jeonbuk Agricultural Research & Extension Services). 1977. Fertilization test on ginger. Jeonbuk ARES Test Research Report. (in Korean)
- Jeonbuk ARES (Jeonbuk Agricultural Research & Extension Services). 2003. Research on cultivation technology of spring barley. Jeonbuk ARES Test Research Report. (in Korean)
- Jeonbuk ARES (Jeonbuk Agricultural Research & Extension Services). 2004. Changes in quantity and quality according to nitrogen fertilization amount by cultivation recommended variety. Jeonbuk ARES Test Research Report. (in Korean)
- Jeonnam ARES (Jeonnam Agricultural Research & Extension Services). 1970. Potato fertilization test. Jeonnam ARES Test Research Report. (in Korean)
- Jung, K.S., K.H. Jung, W.K. Park, Y.S. Song, and K.H. Kim. 2010. Establishment of the optimum nitrogen application rates for oriental melon at various growth stages with a fertigation system in a plastic film house. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(3):349-355.
- KREI (Korea Rural Economic Institute). 2005. Study on implementation plan of regional nutrient management institution. (in Korean)
- KREI (Korea Rural Economic Institute). 2015. Study on introduction of nutrient management institution. (in Korean)
- Kwak, H.K., Y.S. Song, and C.H. Hong. 1997. Nitrogen recommendation based on soil nitrate test for chinese cabbage grown in plastic film house. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30(1):84-88.
- Lee, J.H. and Y.M. Yoon. 2019. Comparison of nutrient balance and nutrient loading index for cultivated land nutrient management. *Korean J. Environ. Biol.* 37(4):554-567.
- 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.

- Lim, D.Y., H.D. Ryu, E.G. Chung, Y. Kim, and J.K. Lee. 2017. Regional Application of the OECD Nitrogen Budget Considering Livestock Manure Compost. *J. Korean Soc. Water Environ.* 33(5):546-555.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2018. Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook. (in Korean)
- ME (Ministry of Environment) · MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2004. Integrated actions for the management and utilization of livestock manure. (in Korean)
- ME (Ministry of Environment) · MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2016. Study on introduction of cropland nutrient management institution. (in Korean)
- NACF (National Agricultural Cooperative Federation). 2017. Fertilizer business statistics. (in Korean)
- OECD. 2021. <https://data.oecd.org/agrland/nutrient-balance.htm>
- Park, C.S., K.T. Um, and L.Y. Kim. 1984. Variation of soil characteristics for soil color groups in Jeju-Do Korean J. Soil Sci. Fert. 17:141-146.
- RDA (Rural Development Administration). 1968. Fertilization test on apple orchard. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1969. Buckwheat fertilization and planting density test. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1970a. Fertilization test on grape orchard. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1970b. Fertilization test on peach orchard. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1971a. Effect of fertilization level of spring sowed onion on yield response. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1971b. Fertilization test on Persimmon orchard. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1979. New corn variety fertilization test. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1981. Fertilization test on peanuts. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1987. Peach rational fertilization test. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1997a. Buckwheat fertilization and seeding rate test. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 1997b. Fertilization test on perilla seeds by direct sowing cultivation. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 2000. Investigation of nitrogen fertilization amount for highland chinese cabbage. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 2009a. Development of fertilizer-saving rice varieties and cultivation technology. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 2009b. Research on fertilization standards for fertigation in greenhouse. RDA Test Research Report. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration). 2017. A study on setting fertilization amount for improvement of red bean productivity. RDA Test Research Report. (in Korean)
- Song, K.C. and S.H. Yoo. 1991. Andic properties of major soils in Cheju Island. I. Characterization of volcanic ash soils by selective dissolution analysis. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 24:86-94.