Research article

토지수지와 토양수지에 의한 지역 양분수지 지표 비교 연구

이준형¹ · 윤영만^{2,3*}

¹국립 한경대학교 응용자원환경학부 대학원 박사과정, ²국립 한경대학교 식물생명환경전공 교수,

³국립 한경대학교 바이오가스연구센터 센터장

Comparison of the regional nutrient balance index by land and soil budget

Jun Hyeong Lee¹, Young Man Yoon^{2,3*}

¹Ph.D. Candidate, School of Applied Science in Natural Resources & Environment, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do, 17579, Republic of Korea

²Professor, Department of Plant & Environmental Science, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do, 17579, Republic of Korea

³Director, Biogas Research Center, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do, 17579, Republic of Korea

Corresponding author

Young Man Yoon

Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do, 17579, Republic of Korea

Tel : +82-31-670-5086

Fax : +82-31-670-5089

E-mail : yyman@hknu.ac.kr

Received : June 3, 2021

Revised : June 23, 2021

Accepted : June 25, 2021

The regional nutrient management system that manages excess nutrients (nitrogen and phosphorus) of agricultural land is in the process of introducing in Korea. In this study, agricultural nutrient balance indicators (GNB; Gross nutrient balance, and NNB; Net nutrient balance) were compared and analyzed by the nutrient balance analytical methodologies of land and soil budget in order to assess regional nutrient balance for nitrogen and phosphorus. The average GNB-N and NNB-N of the provincial level (si and do), which were analyzed by land budget, were 358 and 180 kg-N ha⁻¹, and the GNB-P and NNB-P that were analyzed by land budget showed a same value of 55 kg-P ha⁻¹. The average GNB-N and NNB-N that were analyzed by soil budget were 220 and 180 kg-N ha⁻¹, and the GNB-P and NNB-P showed a same value of 35 kg-P ha⁻¹. Therefore, the higher GNB-N value was gained in the methodology of land budget, and NNB-N did not show the significant difference between the methodology of land and soil budget. However, GNB-P and NNB-P showed the higher values in the both of methodologies of land and soil budget.

Key words : Nutrient balance, Soil budget, Land budget, Gross nutrient balance, Net nutrient balance

서론

우리나라는 2017년 기준 OECE 국가 양분수지 지표에서 질소수지 1위, 인수지 2위로 보고되고 있으며 (OECD, 2017), 전국 무기질 비료 중 질소질 비료와 인산질 비료의 사용량은 2015년 188,883, 61,469 ton에서 2019년 250,657, 79,805 ton으로 증가한 것으로 보고되고 있어 (MAFRA,

2020), 농경지에 양분의 과다 투입으로 인한 수계 비점 오염원 관리의 필요성이 증대되고 있다. 농경지로 투입된 양분은 작물에 흡수 이용되며, 작물에 이용되지 않는 잉여 양분은 대기·수계 등으로 유출되어 농업 환경에 악영향이 우려된다. 이에 정부는 「가축분뇨 관리·이용 대책」 (ME·MAFRA, 2004), 「지역단위 양분총량제도 도입 세부시행 방안 연구」 (KREI, 2005), 「지역단위 양분총량제도 도입

세부시행방안 연구」(KREI, 2005), 「양분총량제 도입을 위한 기반조성 연구」(ME·MAFRA, 2016), 「농업분야 양분수지 개선 방법론 및 정책 비교 평가」(RDA, 2019) 등의 연구를 통해 농경지 투입양분을 적정수준으로 유지하기 위한 정책을 추진하였으며, 이에 환경부는 2021년 지역의 농업환경을 고려한 지역단위 양분관리 제도 도입을 추진하고 있다.

양분수지 지표는 농경지로 투입되는 양분과 작물생산, 작물부산물 이용, 대기, 수계로 유출되는 양분의 수지를 나타낸다(Kim et al., 2017; Lee et al., 2021). 일반적으로 사용되고 있는 양분수지 지표는 총양분수지(Gross nutrient balance, GNB)와 순양분수지(Net nutrient balance, NNB) 지표가 있으며, 총양분수지 지표는 농경지로 투입된 양분 중에서 대기과 수계로 유출되는 양분의 양(kg/ha)을 의미한다. 순양분수지 지표는 농경지로 투입된 양분 중에서 수계로 유출되는 양분의 양(kg/ha)을 의미한다. 양분수지 지표는 농경지가 요구하는 양분 요구량 대비 투입양분의 비율을 의미하는 양분부하(Nutrient loading) 지표와 비교하여 산정항목이 많고 산정방법이 복잡한 측면이 있으나, 다양한 양분저감 방안을 가지는 장점이 있다(Lee and Yoon, 2019).

양분수지는 산정 방법은 분석대상의 경계조건에 따라 농장수지(Farm budget), 토지수지(Land budget), 토양수지(Soil budget)로 구분하고 있다(Leip et al., 2011). 농장수지는 개별 경축순환 농장을 경계조건으로 설정한다. 또한, 토지수지는 지역(행정구역 등)을 경계조건으로 설정하고 있으며, 토양수지는 지역 내 농경지를 경계조건으로 설정하고 있다. 일반적으로 토지수지는 가축분뇨 저장 및 퇴·액비화 과정에서 일어나는 질소 휘산량을 포함하여 산정하나, 토양수지는 가축분뇨 저장 및 퇴·액비화 과정에서 일어나는 질소 휘산량을 산정하지 않는 특성이 있다. 따라서 토양수지는 토지수지와 비교하여 양분의 유입 및 유출과 관련한 산정항목에서는 유사한 특성이 있으나 지역 또는 농경지의 경계조건의 차이로 인하여 양분수지 지표에서 차이를 보인다. 국내에서는 토지수지와 토양수지에 의한 농경지 양분관리지표 산정방법이 연구된 바 있으며(RDA, 2019), KREI (2018)에서는 토지수지와 토양수지 산정방법을 비교하고, 토지수지의 경우, 농업환경의 종합적인 양분수지 자료를 확보할 수 있으나, 대기 질소유출의 과다 산출 및 부정확성, 퇴·액비 자원화, 정화처리에 의한

양분 감소를 고려하지 못하는 단점을 지적한 바 있다. 또한, 토양수지 방법론은 농경지 중심의 양분관리가 가능하다는 장점이 있으며, 가축분뇨 자원화 및 정화처리 시 소실되는 양분이 제외되어 축산업계의 제도 수용성이 유리하다고 보고한 바 있다. 그러나 합리적인 양분관리제도 도입을 위한 여러 토지수지와 토양수지 방법론의 비교 연구에도 불구하고, 실제 지역단위 양분수지 사례 분석을 통한 양분수지 지표간의 비교 연구는 미미한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 양분관리제도의 도입과 관련하여 지역의 양분수지 사례 분석자료에 기초하여 토지수지와 토양수지 방법론에서의 양분수지 지표를 비교하고자 하였으며, 이를 위해, 2019년 전국 도 단위의 토지수지와 토양수지 방법론에 기초하여 양분수지 지표(총양분수지, 순양분수지)를 산출하였으며, 양분수지 지표 산정결과를 통해 각 양분수지 산출 방법론 간의 특성을 비교·분석하였다.

재료 및 방법

1. 양분수지

(1) 분석모델

농경지 양분수지의 분석에서 유입양분은 농업생산을 위해 투입하는 비료(가축분뇨 퇴·액비, 무기질비료, 유기질비료)를 항목으로 두었으며, 경작지 내에서의 생물학적 질소고정, 종자투입, 대기강하물, 관개용수에서 기인하는 양분투입 항목을 모델에 반영하였다(Figure 1). 농경지 유출양분 분석은 작물생산·부산물로 인한 양분의 유출과 지하침출, 유거에 의한 수계유출, 휘발, 탈질(N_2O)에 의한 대기유출 항목을 설정하였다(Lee and Yoon, 2019).

(2) 토양수지 분석 방법

토양수지의 산출항목은 크게 유입과 유출항목으로 구분하며, 유입항목에는 무기질 비료, 가축분뇨 퇴·액비, 유기질비료, 생물학적 질소고정, 대기강하물에 의한 질소 유입, 종자, 종묘, 관개수에 의한 양분 유입이 있으며(Table 1), 양분의 유출항목에는 작물생산, 작물부산물의 회수 이용에 의한 양분 유출, 대기로의 암모니아 휘산 및 탈질에 의한 양분유출, 수계로의 양분 유출(Table 2)이 있다.

(3) 토지수지 분석 방법

토지수지의 산출항목은 토양수지의 산출항목은 동일하며, 유입항목은 Table 3, 유출항목은 Table 4와 같다.

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

Table 1. Equations for calculation of nutrient input amount by soil budget.

Nutrient input		Equations
N ₁	Inorganic fertilizer (IOF _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i F_i C_i$ [F _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : supply by fertilizer type (i), C _i (%) : nutrient content by fertilizer type (i)]
N ₂	Livestock fertilizer (LF _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_m (\sum_l (\sum_k (\sum_{i,j} LH_i \times LM_j) \times LFP_k) \times LFC_l) \times LFT_m$ [LH _i (heads) : head number by livestock type (i), LM _j (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : 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)]
N ₃	Organic fertilizer (OF _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i OF_i \times OFC_i$ [OF _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : supply by organic fertilizer type (i), OFC _i (%) : nutrient content by organic fertilizer type (i)]
N ₄	Nitrogen fixation (BNF _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i BNC_i \times (1 + P_i) \times BM_i \times BNFU_i$ [BNC _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : 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 ⁻¹ -DM) : biological nitrogen fixation unit by leguminous crop type (i)]
N ₅	Atmospheric deposition (AP _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_{i,j} A_i \times APU_j$ [A _i (ha) : cultivation area by crop type (i), APU _j (kg-N ha ⁻¹ ha ⁻¹ yr ⁻¹) : Atmospheric deposition coefficient by deposition type (Wet & dry deposition) (j)]
N ₆	Seed & plant material (S _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i S_i \times SN_i$ [S _i (ha) : sowing amount by crop type (i), SN _i (%) : nutrient content by crop type (i)]
N ₇	Irrigation water (IW _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$A_{rice} \times 0.3m \times 4 \times IWC$ [A _{rice} (ha) : rice cultivation area, IWC (%) : nutrient content of irrigation water]

Table 2. Equations for calculation of nutrient output amount by soil budget.

Nutrient output		Equations
N ₈	Crop production (CP _{output} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i CP_i \times CPN_i$ [CP _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : crop production by crop type (i), CPN _i (%) : nutrient content by crop type (i)]
N ₉	Crop byproduct (CB _{output} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i CP_i \times B_i \times BC_i$ [CP _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : 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)]

Table 2. Equations for calculation of nutrient output amount by soil budget. (Continued)

Nutrient output		Equations
N ₁₀)	Atmospheric outflow (VD _{output} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i^n (FS_i \times FV_i) + \sum_j^n (A_j \times DN_j)$ [FS _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : 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 ⁻¹) : N ₂ O-N emission amount by crop type (j)]
N ₁₁)	Water system outflow (WP _{output} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	N8 - N9 - N10

Table 3. Equations for calculation of nutrient input amount by land budget.

Nutrient input		Equations
N ₁)	Inorganic fertilizer (IOF _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i^n F_i C_i$ [F _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : supply by fertilizer type (i), C _i (%) : nutrient content by fertilizer type (i)]
N ₂)	Livestock fertilizer (LF _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_l^n (\sum_k^n (\sum_{i,j}^n LH_i \times LM_j) \times LFP_k) \times LFC_l$ [LH _i (heads) : head number by livestock type (i), LM _j (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : 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)]
N ₃)	Organic fertilizer (OF _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i^n OF_i \times OFC_i$ [OF _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : supply by organic fertilizer type (i), OFC _i (%) : nutrient content by organic fertilizer type (i)]
N ₄)	Nitrogen fixation (BNF _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i^n BNC_i \times (1 + P_i) \times BM_i \times BNFU_i$ [BNC _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : 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 ⁻¹ -DM) : biological nitrogen fixation unit by leguminous crop type (i)]
N ₅)	Atmospheric deposition (AP _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_{i,j}^n A_i \times APU_j$ [A _i (ha) : cultivation area by crop type (i), APU _j (kg-N ha ⁻¹ ha ⁻¹ yr ⁻¹) : Atmospheric deposition coefficient by deposition type (Wet & dry deposition) (j)]
N ₆)	Seed & plant material (S _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i^n S_i \times SN_i$ [S _i (ha) : sowing amount by crop type (i), SN _i (%) : nutrient content by crop type (i)]
N ₇)	Irrigation water (IW _{input} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$A_{rice} \times 0.3m \times 4 \times IWC$ [A _{rice} (ha) : rice cultivation area, IWC (%) : nutrient content of irrigation water]

Table 4. Equations for calculation of nutrient input amount by land budget.

Nutrient output		Equations
N ₈)	Crop production (CP _{output} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i^n CP_i \times CPN_i$ [CP _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : crop production by crop type (i), CPN _i (%) : nutrient content by crop type (i)]
N ₉)	Crop byproduct (CB _{output} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	$\sum_i^n CP_i \times B_i \times BC_i$ [CP _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : 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)]
	Atmospheric outflow (VD _{output} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	(VD _{output})-1 + (VD _{output})-2
N ₁₀)	(VD _{output})-1	$\sum_i^n (FS_i \times FV_i) + \sum_j^n (A_j \times DN_j)$ [FS _i (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) : 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 ⁻¹) : N ₂ O-N emission amount by crop type (j)]
	(VD _{output})-2	(LM _{input}) - (LF _{input})
N ₁₁)	Water system outflow (WP _{output} , kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	N8 - N9 - N10

2. 양분관리 지표의 산출방법

본 연구에서의 양분관리 지표의 종류와 산출방법은 Table 5와 같다. 총양분수지 (Gross nutrient balance, GNB)는 총 양분의 유입에서 작물생산·부산물로 인한 양분유출을 제외하여 산출하였으며, 대기유출과 수계유출의 합을 의미한다. 순양분수지 (Net nutrient balance, NNB)는 총 양분의 유입에서 작물생산·부산물로 인한 양분의 유출과 대기 유출로 인한 양분의 유출을 제외하여 산출하였으며, 수계 유출을 의미한다.

3. 통계자료

지역단위 양분수지 분석을 위한 통계자료는 2019년도를 기준년도로 하였으며, 가축사육두수 가축분뇨 처리현황은 환경부 (ME, 2021), 무기질비료는 농림축산식품통계연보 (MAFRA, 2020)를 사용하였다. 유기질비료는 비료사업통계 (NACF, 2017)를 사용하였다. 기타 양분의 유입 유출 항목의 산출을 위한 통계자료 및 조정계수는 ME·MAFRA (2016)의 보고서 자료에 근거하여 산출하였다.

Table 5. Method of calculating the nutrient management indicators.

Nutrient management indicator	Calculation method
Gross nutrient balance [†]	Total input nutrient (N, P) - Output nutrient by Crop product and byproduct (N, P)
Net nutrient balance [‡]	Total input nutrient (N, P) - Output nutrient by Crop product and byproduct (N, P) - Output nutrient by atmospheric out-flow (N, P)

[†]Gross nutrient balance, [‡]Net nutrient balance.

Table 6. Nitrogen input in croplands according to the soil budget.

Province	Livestock manure	Inorganic fertilizer	Organic fertilizer	Nitrogen fixation	Seed and planting materials	Atmospheric deposition	Irrigation water	Sum
kg-N ha ⁻¹ yr ⁻¹ (%)								
Gyeonggi	187.85 (51.81)	128.45 (35.43)	17.08 (4.71)	1.17 (0.32)	1.88 (0.52)	23.19 (6.40)	2.98 (0.82)	362.60 (100)
Gangwon	70.40 (21.44)	199.34 (60.70)	31.20 (9.50)	1.84 (0.56)	1.56 (0.48)	23.19 (7.06)	0.87 (0.27)	328.41 (100)
Chung-buk	100.17 (34.67)	128.54 (44.49)	31.54 (10.92)	2.59 (0.90)	1.33 (0.46)	23.19 (8.03)	1.57 (0.54)	288.93 (100)
Chung-nam	127.31 (38.12)	161.56 (48.38)	14.58 (4.37)	1.10 (0.33)	2.14 (0.64)	23.19 (6.94)	4.06 (1.22)	333.95 (100)
Jeon-buk	100.14 (32.20)	165.98 (53.38)	12.32 (3.96)	1.84 (0.59)	1.93 (0.62)	23.19 (7.46)	5.56 (1.79)	310.95 (100)
Jeon-nam	58.24 (22.13)	159.34 (60.55)	17.20 (6.54)	0.92 (0.35)	1.84 (0.70)	23.19 (8.81)	2.42 (0.92)	263.16 (100)
Gyeong-buk	82.74 (29.92)	125.98 (45.56)	38.23 (13.83)	1.40 (0.51)	1.40 (0.51)	23.19 (8.39)	3.59 (1.30)	276.52 (100)
Gyeong-nam	72.93 (27.39)	146.02 (54.84)	20.12 (7.56)	0.70 (0.26)	1.60 (0.60)	23.19 (8.71)	1.69 (0.63)	266.25 (100)
Jeju	51.98 (16.53)	203.43 (64.68)	34.27 (10.90)	1.05 (0.33)	0.61 (0.19)	23.19 (7.37)	-	314.53 (100)

결과 및 고찰

1. 양분유입

토양수지로 분석한 전국 도 단위의 단위면적당 질소 유입은 Table 6과 같다. 경기도의 질소 유입량은 362.60 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 187.85, 무기질비료 128.54 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹으로 나타났으며, 제주도의 질소 유입량은 314.53 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 51.98, 무기질비료 203.43 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹이었다. 전국 도 단위의 단위면적당 평균 질소 유입량은 305.03 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 94.64, 무기질비료 157.63 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹이었다.

토지수지로 분석한 전국 도 단위의 단위면적당 질소 유입은 Table 7과 같다. 경기도의 질소 유입량은 589.63 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 414.88, 무기질비료 128.45, 유기질비료 17.08 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹이었으며, 제주도의 질소 유입량은 385.16 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 122.61, 무기질비료 203.43, 유기질비료 34.27 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹였다. 전국 도 단위의 단위면적당 평균 질소 유입량은 440.91 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 94.64, 무기질비료 157.63 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹이다.

토양수지로 분석한 전국 도 단위의 단위면적당 인 유입은 Table 8과 같다. 경기도의 인 유입량은 74.08 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 49.83, 무기질비료 19.63, 유기질비료 4.01 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다. 제주도의 인 유입량은 73.69 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 13.35, 무기질비료 52.18, 유기질비료 8.05 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다. 전국 도 단위의 단위면적당 평균 인 유입량은 56.63 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 가축분뇨 퇴·액비 26.04, 무기질비료 24.41 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다.

토지수지로 분석한 전국 도 단위의 단위면적당 인 유입은 Table 9와 같다. 경기도의 인 유입량은 $108.84 \text{ kg-P ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 가축분뇨 퇴·액비 84.59 , 무기질비료 19.63 , 유기

질비료 $4.01 \text{ kg-P ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이다. 제주도의 인 유입량은 $84.03 \text{ kg-P ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 가축분뇨 퇴·액비 23.69 , 무기질비료 52.18 , 유기질비료 $8.05 \text{ kg-P ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이다. 전국 도단위의

Table 7. Nitrogen input in croplands according to the land budget.

Province	Livestock manure	Inorganic fertilizer	Organic fertilizer	Nitrogen fixation	Seed and planting materials	Atmospheric deposition	Irrigation water	Sum
kg-N ha ⁻¹ yr ⁻¹ (%)								
Gyeonggi	414.88 (70.36)	128.45 (21.79)	17.08 (2.90)	1.17 (0.20)	1.88 (0.32)	23.19 (3.93)	2.98 (0.51)	589.63 (100)
Gangwon	188.63 (42.23)	199.34 (44.63)	31.20 (6.99)	1.84 (0.41)	1.56 (0.35)	23.19 (5.19)	0.87 (0.20)	446.65 (100)
Chung-buk	246.85 (56.67)	128.54 (29.51)	31.54 (7.24)	2.59 (0.60)	1.33 (0.31)	23.19 (5.32)	1.57 (0.36)	435.62 (100)
Chung-nam	316.78 (60.52)	161.56 (30.87)	14.58 (2.79)	1.10 (0.21)	2.14 (0.41)	23.19 (4.43)	4.06 (0.78)	523.42 (100)
Jeon-buk	227.02 (51.85)	165.98 (37.91)	12.32 (2.81)	1.84 (0.42)	1.93 (0.44)	23.19 (5.30)	5.56 (1.27)	437.84 (100)
Jeon-nam	150.07 (42.28)	159.34 (44.89)	17.20 (4.85)	0.92 (0.26)	1.84 (0.52)	23.19 (6.53)	2.42 (0.68)	354.99 (100)
Gyeong-buk	221.03 (53.28)	125.98 (30.37)	38.23 (9.22)	1.40 (0.34)	1.40 (0.34)	23.19 (5.59)	3.59 (0.87)	414.81 (100)
Gyeong-nam	186.72 (49.13)	146.02 (38.42)	20.12 (5.29)	0.70 (0.18)	1.60 (0.42)	23.19 (6.10)	1.69 (0.44)	380.04 (100)
Jeju	122.61 (31.83)	203.43 (52.82)	34.27 (8.90)	1.05 (0.27)	0.61 (0.16)	23.19 (6.02)	-	385.16 (100)

Table 8. Phosphorus input in croplands according to the soil budget.

Province	Livestock manure	Inorganic fertilizer	Organic fertilizer	Nitrogen fixation	Seed and planting materials	Atmospheric deposition	Irrigation water	Sum
kg-P ha ⁻¹ yr ⁻¹ (%)								
Gyeonggi	49.83 (67.26)	19.63 (26.50)	4.01 (5.41)	-	0.36 (0.49)	-	0.24 (0.33)	74.08 (100)
Gangwon	22.43 (36.95)	30.60 (50.41)	7.33 (12.07)	-	0.29 (0.48)	-	0.05 (0.09)	60.71 (100)
Chung-buk	25.28 (47.95)	19.66 (37.29)	7.41 (14.05)	-	0.26 (0.49)	-	0.12 (0.23)	52.73 (100)
Chung-nam	34.31 (59.56)	19.11 (33.17)	3.43 (5.95)	-	0.42 (0.73)	-	0.34 (0.59)	57.61 (100)
Jeon-buk	24.99 (53.44)	17.98 (38.45)	2.89 (6.19)	-	0.38 (0.80)	-	0.52 (1.12)	46.77 (100)
Jeon-nam	16.69 (43.06)	17.47 (45.08)	4.04 (10.43)	-	0.36 (0.93)	-	0.19 (0.50)	38.75 (100)
Gyeong-buk	25.85 (46.98)	19.59 (35.61)	8.98 (16.32)	-	0.27 (0.50)	-	0.33 (0.60)	55.02 (100)
Gyeong-nam	21.61 (42.9)	23.50 (46.75)	4.73 (9.40)	-	0.31 (0.62)	-	0.12 (0.24)	50.27 (100)
Jeju	13.35 (18.12)	52.18 (70.80)	8.05 (10.92)	-	0.11 (0.15)	-	-	73.69 (100)

Table 9. Phosphorus input in croplands according to the land budget.

Province	Livestock manure	Inorganic fertilizer	Organic fertilizer	Nitrogen fixation	Seed and planting materials	Atmospheric deposition	Irrigation water	Sum
kg-P ha ⁻¹ yr ⁻¹ (%)								
Gyeonggi	84.59 (77.72)	19.63 (18.04)	4.01 (3.69)	-	0.36 (0.33)	-	0.24 (0.22)	108.84 (100)
Gangwon	39.41 (50.73)	30.60 (39.39)	7.33 (9.43)	-	0.29 (0.38)	-	0.05 (0.07)	77.69 (100)
Chung-buk	46.76 (63.01)	19.66 (26.49)	7.41 (9.98)	-	0.26 (0.35)	-	0.12 (0.16)	74.21 (100)
Chung-nam	61.63 (72.56)	19.11 (22.50)	3.43 (4.03)	-	0.42 (0.49)	-	0.34 (0.40)	84.93 (100)
Jeon-buk	42.73 (66.24)	17.98 (27.88)	2.89 (4.48)	-	0.38 (0.58)	-	0.52 (0.81)	64.51 (100)
Jeon-nam	29.83 (57.49)	17.47 (33.66)	4.04 (7.79)	-	0.36 (0.69)	-	0.19 (0.37)	51.89 (100)
Gyeong-buk	44.74 (60.53)	19.59 (26.51)	8.98 (12.15)	-	0.27 (0.37)	-	0.33 (0.44)	73.92 (100)
Gyeong-nam	37.26 (56.52)	23.50 (35.66)	4.73 (7.17)	-	0.31 (0.47)	-	0.12 (0.18)	65.92 (100)
Jeju	23.69 (28.19)	52.18 (62.09)	8.05 (9.58)	-	0.11 (0.14)	-	-	84.03 (100)

단위면적당 평균 인 유입량은 $76.22 \text{ kg-P ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 가축 분뇨 퇴·액비 45.63 , 무기질비료 $24.41 \text{ kg-P ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이다.

토양수지와 토지수지 분석에서 양분유입은 대부분 가축 분뇨 퇴·액비, 무기질비료가 차지한다. 일반적으로 가축 분뇨 퇴·액비에서 유래하는 양분은 지역의 축산현황의 특성을 반영하고 가축사육두수와 비례하는 경향을 보이지만 축종별 분뇨의 질소, 인의 배출량 차이, 가축분뇨 처리현황, 퇴·액비의 자원화 과정에서 대기로의 휘산 등의 이유로 차이를 보이기도 한다. 지역별 양분유입 현황을 고려할 때, 경기도는 가축분뇨 퇴·액비 관리를 통한 양분수지 관리가 요구된다. 제주도는 화강암질 토양으로 구성되어 있는 육지와 다르게 현무암질 토양으로 구성되어 있다. 제주도의 현무암질 토양은 양이온치환용량과 인산성분의 흡착·고정 능력이 커서 비료성분의 작물 유효도가 낮은 특성이 있어 다른 지역에 비해 무기질 비료 시비량이 많은 특징이 있다. 따라서 제주도 지역의 경우 무기질비료 관리를 통한 양분수지 관리가 요구되는 특징이 있다 (Lee et al., 2021).

2. 양분유출

토양수지로 분석한 전국 도 단위의 단위면적당 질소 유출은 Table 10과 같다. 경기도의 질소 유출량은 $362.60 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 작물생산 48.10 , 작물부산물 32.39 , 대기유출 56.51 , 수계유출 $225.61 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이다. 제주도의 질소 유출량은 $314.53 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 작물생산 47.36 , 작물부산물 7.52 , 대기유출 40.00 , 수계유출 $219.64 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이다. 전국 도 단위의 단위면적당 평균 질소 유출량은 $305.03 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 작물생산 47.80 , 작물부산물 35.13 , 대기유출 41.77 , 수계유출 $180.34 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이다.

토지수지로 분석한 전국 도 단위의 단위면적당 질소 유출은 Table 11과 같다. 경기도의 질소 유출량은 $589.63 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 작물생산 48.10 , 작물부산물 32.39 , 대기유출 283.53 , 수계유출 $225.61 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이다. 제주도의 질소 유출량은 $385.16 \text{ kg-N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 작물생산 47.36 ,

Table 10. Nitrogen output in croplands according to the soil budget.

Province	Crop		Atmospheric outflow kg-N ha ⁻¹ yr ⁻¹ (%)	Water system outflow	Sum
	Crop production	Crop byproduct			
Gyeonggi	48.10 (13.27)	32.39 (8.93)	56.51 (15.58)	225.61 (62.22)	362.60 (100)
Gangwon	39.54 (12.04)	35.60 (10.84)	42.76 (13.02)	210.51 (64.10)	328.41 (100)
Chung-buk	40.59 (14.05)	33.74 (11.68)	41.33 (14.30)	173.27 (59.97)	288.93 (100)
Chung-nam	56.99 (17.06)	39.91 (11.95)	47.01 (14.08)	190.04 (56.91)	333.95 (100)
Jeon-buk	53.21 (17.11)	37.79 (12.15)	41.39 (13.31)	178.57 (57.43)	310.95 (100)
Jeon-nam	49.59 (18.84)	28.15 (10.70)	32.97 (12.53)	152.45 (57.93)	263.16 (100)
Gyeong-buk	45.71 (16.53)	45.66 (16.51)	38.81 (14.03)	146.35 (52.92)	276.52 (100)
Gyeong-nam	49.08 (18.43)	55.39 (20.81)	35.18 (13.21)	126.59 (47.55)	266.25 (100)
Jeju	47.36 (15.06)	7.52 (2.39)	40.00 (12.72)	219.64 (69.83)	314.53 (100)

Table 11. Nitrogen output in croplands according to the land budget.

Province	Crop		Atmospheric outflow kg-N ha ⁻¹ yr ⁻¹ (%)	Water system outflow	Sum
	Crop production	Crop byproduct			
Gyeonggi	48.10 (8.16)	32.39 (5.49)	283.53 (48.09)	225.61 (38.26)	589.63 (100)
Gangwon	39.54 (8.85)	35.60 (7.97)	160.99 (36.05)	210.51 (47.13)	446.65 (100)
Chung-buk	40.59 (9.32)	33.74 (7.74)	188.01 (43.16)	173.27 (39.78)	435.62 (100)
Chung-nam	56.99 (10.89)	39.91 (7.62)	236.49 (45.18)	190.04 (36.31)	523.42 (100)
Jeon-buk	53.21 (12.15)	37.79 (8.63)	168.27 (38.43)	178.57 (40.78)	437.84 (100)
Jeon-nam	49.59 (13.97)	28.15 (7.93)	124.81 (35.16)	152.45 (42.95)	354.99 (100)
Gyeong-buk	45.71 (11.02)	45.66 (11.01)	177.10 (42.69)	146.35 (35.28)	414.81 (100)
Gyeong-nam	49.08 (12.92)	55.39 (14.58)	148.97 (39.20)	126.59 (33.31)	380.04 (100)
Jeju	47.36 (12.30)	7.52 (1.95)	110.64 (28.73)	219.64 (57.03)	385.16 (100)

작물부산물 7.52, 대기유출 110.64, 수계유출 219.64 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹이다. 전국 도 단위의 단위면적당 평균 질소 유출량은 440.91 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹으로 작물생산 47.80, 작물부산물 35.13, 대기유출 177.65, 수계유출 180.34 kg-N ha⁻¹ yr⁻¹이다. 토양수지로 분석한 전국 도 단위의 단위면적당 인 유출은 Table 12와 같다. 경기도의 인 유출량은 74.08 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 작물생산 12.21, 작물부산물 7.35, 수계유출 54.52 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다. 제주도의 인 유출량은 73.69 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 작물생산 14.51, 작물부산물 1.05, 수계유출 58.14 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다. 전국 도 단위의 단위면적당 평균 인 유출량은 56.63 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 작물생산 14.59, 작물부산물 7.01, 수계유출 35.02 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다.

토지수지로 분석한 전국 도 단위의 단위면적당 인 유출은 Table 13과 같다. 경기도의 인 유출량은 108.84 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 작물생산 12.21, 작물부산물 7.35, 수계유출 89.28 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다. 제주도의 인 유출량은 84.03 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 작물생산 14.51, 작물부산물 1.05, 수계유출

68.47 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다. 전국 도 단위의 단위면적당 평균 인 유출량은 76.22 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹으로 작물생산 14.59, 작물부산물 7.01, 수계유출 54.61 kg-P ha⁻¹ yr⁻¹이다.

토양수지와 토지수지를 포함한 양분수지 분석에서 질소유출은 작물생산, 작물부산물, 대기유출, 수계유출로 구분한다. 인의 경우 대기로의 휘발이 일어나지 않으며, 토양 중에 흡착·고정되는 특성이 있다. 따라서 인의 수계유출 항목에는 토양 중에 흡착 고정되는 인 성분이 대부분을 차지하는 특성이 있다. 일반적으로 인의 수계유출은 수용성 인이 유출되기보다는 토양의 침식 또는 유실과 함께 수계로 유출되는 특성이 있다. 경기도는 단위면적당 가장 많은 양분이 유입되는 지역이지만, 작물생산으로 인한 양분 유출은 강원도 다음으로 낮은 것으로 나타났다.

경기도 지역에서 양분의 유입은 높지만 작물생산이 낮은 것은 양분이 효율적으로 이용되지 못하고 있고 수계로 유출될 수 있는 잠재량이 높다는 것을 의미한다. 따라서 양분유입의 대부분을 차지하는 가축분뇨 퇴·액비, 무기질비

Table 12. Phosphorus output in croplands according to the soil budget.

Province	Crop		Atmospheric outflow kg-P ha ⁻¹ yr ⁻¹ (%)	Water system outflow	Sum
	Crop production	Crop byproduct			
Gyeonggi	12.21 (16.49)	7.35 (9.92)	-	54.52 (73.59)	74.08 (100)
Gangwon	28.26 (46.56)	6.26 (10.30)	-	26.19 (43.14)	60.71 (100)
Chung-buk	11.95 (22.67)	7.05 (13.38)	-	33.72 (63.96)	52.73 (100)
Chung-nam	13.88 (24.10)	9.30 (16.15)	-	34.42 (59.75)	57.61 (100)
Jeon-buk	12.72 (27.19)	8.26 (17.66)	-	25.79 (55.15)	46.77 (100)
Jeon-nam	11.86 (30.62)	6.14 (15.84)	-	20.75 (53.54)	38.75 (100)
Gyeong-buk	12.69 (23.06)	8.97 (16.30)	-	33.36 (60.64)	55.02 (100)
Gyeong-nam	13.24 (26.34)	8.74 (17.38)	-	28.29 (56.28)	50.27 (100)
Jeju	14.51 (19.69)	1.05 (1.42)	-	58.14 (78.89)	73.69 (100)

Table 13. Phosphorus output in croplands according to the land budget.

Province	Crop		Atmospheric outflow kg-P ha ⁻¹ yr ⁻¹ (%)	Water system outflow	Sum
	Crop production	Crop byproduct			
Gyeonggi	12.21 (11.22)	7.35 (6.75)	-	89.28 (82.03)	108.84 (100)
Gangwon	28.26 (36.38)	6.26 (8.05)	-	43.17 (55.57)	77.69 (100)
Chung-buk	11.95 (16.10)	7.05 (9.51)	-	55.21 (74.39)	74.21 (100)
Chung-nam	13.88 (16.35)	9.30 (10.96)	-	61.74 (72.70)	84.93 (100)
Jeon-buk	12.72 (19.71)	8.26 (12.80)	-	43.54 (67.48)	64.51 (100)
Jeon-nam	11.86 (22.86)	6.14 (11.83)	-	33.89 (65.31)	51.89 (100)
Gyeong-buk	12.69 (17.17)	8.97 (12.13)	-	52.26 (70.70)	73.92 (100)
Gyeong-nam	13.24 (20.09)	8.74 (13.25)	-	43.94 (66.66)	65.92 (100)
Jeju	14.51 (17.27)	1.05 (1.24)	-	68.47 (81.49)	84.03 (100)

료 사용 저감과 작물생산성을 향상시켜 양분의 유출을 감소시키면서 효율적으로 이용할 수 있는 관리방안이 요구된다.

3. 양분수지 산출 방법론에 따른 양분관리 지표 비교

토양수지와 토지수지를 이용한 총질소수지 (Gross nutrient balance of nitrogen, GNB-N)와 순질소수지 (Net nutrient balance of nitrogen, NNB-N)를 비교한 결과는 Table 14와 같다. 토양수지와 토지수지에 의한 총질소수지는 각각 전국 평균 222와 358 kg-N ha⁻¹이었으며 순질소수지는

Table 14. Comparison of nitrogen indicators by soil budget and land budget.

Province	Soil budget		Land budget	
	GNB-N [†]	NNB-N [‡]	GNB-N	NNB-N
kg-N ha ⁻¹				
Gyeonggi	282	226	509	226
Gangwon	253	211	372	211
Chung-buk	215	173	361	173
Chung-nam	237	190	427	190
Jeon-buk	220	179	347	179
Jeon-nam	185	152	277	152
Gyeong-buk	185	146	323	146
Gyeong-nam	162	127	276	127
Jeju	260	220	330	220
Average	222	180	358	180

[†]Gross nutrient balance of nitrogen.

[‡]Net nutrient balance of nitrogen.

Table 15. Comparison of phosphorus indicators by soil budget and land budget.

Province	Soil budget		Land budget	
	GNB-P [†]	NNB-P [‡]	GNB-P	NNB-P
kg-P ha ⁻¹				
Gyeonggi	55	55	89	89
Gangwon	26	26	43	43
Chung-buk	34	34	55	55
Chung-nam	34	34	62	62
Jeon-buk	26	26	44	44
Jeon-nam	21	21	34	34
Gyeong-buk	33	33	52	52
Gyeong-nam	28	28	44	44
Jeju	58	58	68	68
Average	35	35	55	55

[†]Gross nutrient balance of phosphorus.

[‡]Net nutrient balance of phosphorus.

180 kg-N ha⁻¹으로 동일하게 나타났다. 순인수지 (Net nutrient balance of phosphorus, NNB-P)를 비교한 결과는 Table 15와 같다. 토양수지와 토지수지의 순인수지는 35.02, 54.61 kg-P ha⁻¹이었다. 토지수지에서의 총질소수지 지표가 높게 평가되는 것은 총질소수지의 지표가 대기 유출량과 수계 유출량을 포함하기 때문이다 (RDA, 2019). 또한, 토지수지의 경우는 농가에서 가축분뇨의 저장 관리 단계 및 가축분뇨의 퇴·액비화 과정에서의 질소 휘산 및 탈질량을 포함하고 있어, 토양수지와 비교해서 대기 유출량이 높게 평가되기 때문이다. 인의 경우, 대기유출이 존재하지 않는 상황에서 순인수지의 차이는 가축분뇨의 저장 및 퇴·액비화 과정에서 일부 인성분이 가축 사육사 및 저장조의 벽면에 침착되거나, 퇴·액비화시 고액분리 과정에서 슬러지로 이동하여 외부로 배출되기 때문이다 (KREI, 2018).

결론

우리나라는 농경지에 투입되고 있는 과잉양분을 관리하고, 지역의 농업환경을 고려하는 지역단위 양분관리제도 도입을 추진하고 있다. 다양한 지역의 농업환경을 반영하는 양분수지 분석모델 중 토지수지와 토양수지를 이용하여 우리나라 전국 도단위의 총양분수지와 순양분수지를 분석하였다. 토지수지는 농가에서 저장 관리 단계 및 가축분뇨의 퇴·액비화 과정에서의 질소 휘산 및 탈질량을 포함하기 때문에 실제 농경지에 투입되는 양분을 반영하는 토양수지에 비해 질소의 총양분수지 지표 (GNB-N)가 높게 산출되었으며, 순양분수지 지표 (NNB-N)는 토양수지와 동일하게 나타났다. 인성분의 경우 대기유출이 일어나지 않는 특성이 있어 인의 총양분수지 (GNB-P)와 순양분수지 (NNB-P)는 토지수지와 토양수지 각각에서 동일한 지표값을 나타내었다. 즉, 질소의 수계유출 잠재량을 나타내는 질소 순양분수지 지표는 토지수지와 토양수지에서 동일하게 나타났으며, 수계 및 대기로의 유출 잠재량을 나타내는 질소 총양분수지 지표는 토지수지가 높게 나타났다. 따라서 지역단위 양분수지 관리가 수계로의 비점오염원 유출을 관리하고자 하는 경우, 토지수지 또는 토양수지 방법론의 채택이 동일한 지표관리 효과를 나타내는 것으로 평가되었다. 그러나 양분관리제도가 암모니아 휘발 등 대기로의 질소 유출을 관리하고자 하는 경우 가축분뇨의 저장 및 퇴·액비 제조과정에서의 질소 대기유출량을 모두 포함하는 토지수지 방법론이 적합할 것으로 판단되었다.

이와 같이, 지역 양분수지 분석 사례에 기초하여 토지수지와 토양수지의 방법론을 비교한 결과, 지역단위 양분수지 관리를 위한 양분수지 산출 방법론은 양분관리 제도의 도입의 관리 목적에 따라 채택하는 것이 합리적인 것으로 나타났다. 농경지에서의 비점오염원 관리를 주요 목적으로 하는 경우, 경계조건을 농경지로 설정하고 있는 토양수지 방법론이 적합할 것으로 판단되었다.

사 사

본 논문은 농림식품기술기획평가원 공동연구사업 (과제번호: PJ 421046-03)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인용문헌

- Kim, D.W., Ryu, H.D., Lim, D.Y., Chung, E.G., Kim, Y.S., 2017. Development of a nutrient budget model for livestock excreta survey. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(6), 769-779.
- KREI, 2005. Study on implementation plan of regional nutrient management institution (Korean). Korea Rural Economic Institute, Naju, Korea.
- KREI, 2018. Development of nutrient management manual (in Korean). Korea Rural Economic Institute, Naju, Korea.
- Lee, J.H., An, J.H., Cho, E.S., Yoon, Y.M., 2021. Study of methodology estimating the net nitrogen balance for the management of regional nutrient balance. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 54(2), 174-192.
- Lee, J.H., Yoon, Y.M., 2019. Comparison of nutrient balance and nutrient loading index for cultivated land nutrient management. *Korean Journal of Environmental Biology*, 37(4), 554-567.
- Leip, A., Britz, W., Weiss, F., Vries, W.D., 2011. Farm, land, and soil nitrogen budgets for agriculture in Europe calculated with CAPRI. *Environmental Pollution*, 159, 3243-3253.
- MAFRA, 2020. Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook (in Korean). Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- ME · MAFRA, 2004. Integrated actions for the management and utilization of livestock manure (in Korean). Ministry of environment · Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- ME · MAFRA, 2016. Study on introduction of cropland nutrient management institution (in Korean). Ministry of environment · Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- ME, 2021. Livestock manure generation and treatment status (in Korean). Ministry of Environment, Sejong, Korea.
- NACF, 2017. Fertilizer business statistics. National Agricultural Cooperative Federation, Seoul, Korea.
- OECD, 2017. OECD compendium of agri-environmental indicators. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France.
- RDA, 2019. Comparison and evaluation of methodology for the improvement of farmland nutrient balance. Rural Development Administration, Jeonju, Korea.