

2010년도 대한민국 농업 및 축산업지역의 질소 유입 및 유출 수치 Nitrogen Budgets of Agriculture and Livestock in South Korea at 2010

남역현 · 안상우 · 정명숙* · 박재우[†]
Yock-Hyun Nam · Sang-Woo An · Myung-Sook Jung* · Jae-Woo Park[†]

한양대학교 건설환경공학과 · *국립환경과학원 물환경공학연구과
Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

(2011년 11월 21일 접수, 2012년 3월 28일 채택)

Abstract : The objectives of this research were to estimate nitrogen budgets in agriculture and livestock in 2010, and to evaluate nitrous oxide (N₂O) emission by a local government. Input-output budgets for nitrogen were categorized into two sections including agriculture and livestock. Fertilizer, deposition, fixation, compost, irrigation, and feed were used as the nitrogen inputs while crop production, crop uptake, denitrification, volatilization, leaching, compost, and ocean disposal were used as the nitrogen outputs. Annual nitrogen input and output for agriculture and livestock were 1,148,848 N ton/yr and 610,380 N ton/yr respectively indicating the decrease of the nitrogen input and output, compared to our previous researches in 2005 and 2008. Total nitrogen input in 16 local government was estimated resulting that N₂O emission was the highest for Jeonnam (2,574 ton/yr) and the lowest for Seoul (7 ton/yr).

Key Words : Nitrogen, Nitrogen Budget, Nitrous Oxide, Agriculture, Livestock

요약 : 본 연구에서는 농업 및 축산업에서의 질소수지 경향을 파악하며 총 유입되는 질소량을 고려한 아산화질소(N₂O) 발생량을 지자체별로 평가하였다. 농업지역은 경작이 이뤄지는 논과 밭으로 세분화 하였으며 축산업지역은 축산업종을 대상으로 구분하였다. 질소의 주요 유입으로는 작물생산을 위한 질소질 화학비료에 의한 토양 내 유입량, 건식 및 습식을 포함한 대기로부터의 질소 침착량, 질소고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량, 미처리된 가축분뇨에 의한 유입 및 퇴비의 재사용량, 관개용수에 의한 토양으로 질소 유입, 가축사료를 통한 유입이 있으며, 유출된 양은 연간 생산된 농작물 내의 질소함유량, 농경지 작물 질소 흡수량, 질소질 화학비료 사용량에 따른 토양에서의 탈질량과 휘발량, 지하수 유출량, 가축 분뇨 발생량 중 휘발되거나 탈질되는 양, 퇴비로 재사용된 양, 가축분뇨 해양투기에 의한 유출로 결정하고 그 양을 추정하였다. 연간 질소의 총 유입량은 1,148,848 N ton/yr이며, 총 유출량은 610,380 N ton/yr이었다. 2005, 2008, 2010년 질소 수지를 비교 및 분석한 결과, 2010년 총 유입된 질소는 2005년 질소유입 보다 238,654 N ton/yr이 저감된 것으로 조사되었다. 총 유입 질소의 감소는 질소질 화학 비료, 논, 밭 전환, 경지면적의 도로건설 및 도시화장 등으로 인한 결과이며 총 유출 질소는 237,407 N ton/yr이 감소하였다. 총 유입되는 질소량을 고려한 N₂O발생량 지자체별 평가에서 전라남도가 2,574 ton/yr로 N₂O 배출량이 가장 높으며, 서울이 7 ton/yr로 가장 낮다.

주제어 : 질소, 질소수지, 아산화질소, 농업, 축산업

1. 서론

질소는 자연생태계인 대기, 물, 토양, 생물 영역에서 질소 기체(N₂), 암모늄 이온(NH₄⁺), 암모니아(NH₃), 질산성 질소(NO₃⁻), 아질산성 질소(NO₂⁻) 등의 형태로 순환하고 있으나,¹⁻³⁾ 최근 질소질 화학비료의 과잉사용에 의한 토양으로의 질소화합물의 유입, 화석연료 소비에 따른 공장 등의 고정 발생원, 자동차 등의 이동 발생원으로부터 발생하는 질소산화물의 유입에 의해 자연계 질소순환은 크게 변화하고 있는 실정이다.⁴⁾ 전 세계적으로 질소질 화학비료의 증가는 농업생산성 증가에 크게 기여하였으나, 과량의 질소질 화학비료를 투입하면 잔여분이 토양에 집적되거나 주변 수계로 유출되어 부영양화 등을 유발할 수 있으며,⁵⁾ 대기로 배출되는 아산화 질소(N₂O)는 지구온난화에 중요한 요인으로 작용될 수 있다.⁶⁾

우리나라의 질소의 유출입량을 결정하는 방법으로는 직접

하천 등으로부터 바다로 유출되는 유량과 농도를 실측하여 산출하는 방법과 환경부의 원단위법을 이용하여 배출부하량을 산정하는 방법이 있으나,⁷⁾ 이러한 방법들은 작물의 생육시기, 시비시기 등의 영농특성, 토지 이용도, 강우 등으로 인한 질소의 유출입특성이 지역과 유역에 따라 편차가 심하기 때문에 합리적이고 세부적인 배출부하 특성에 대한 정량화가 요구되고 있다. 물질수지분석방법은 전 세계적으로 각 나라의 질소 순환을 이해하는데 많이 사용되고 있으며 기본 원리는 유입된 질소의 양과 배출 및 사용된 질소의 양은 동일하다는 것이므로 분석하고자 하는 공간적 영역의 설정에 따라 전체 질소의 양을 파악할 수 있는 효율적인 연구방법이다.^{2,3,8-15)}

농업생태계의 물질수지 분석을 다룬 국내연구로 김진수, 오광영은 농촌지역의 유기물 흐름에 관한 모형을 설정하고 금강의 제2지천인 무심천의 상류지역인 충북 청원군 가덕면 지역의 질소수지를 제시하였으며,¹⁶⁾ 김창길, 강창용은 지역

[†] Corresponding author E-mail: jaewoopark@hanyang.ac.kr Tel: 02-2220-1483 Fax: 02-2293-9977

단위 농업환경모형을 기초로 사례지역인 경기도 양평군과 충북 진천군의 물질균형 분석을 시도하였다.¹⁷⁾ 이연은 OECD 양분지표 계산방식에 따라 질소수지지표를 산정하였고, 경기도 화성군과 충주시를 사례로 영농형태별(수도작, 시설하우스, 복합영농) 질소수지 분석결과를 제시하였다.¹⁸⁾ 국외 연구로서 Zessner와 Lampert는 오스트리아의 수질관리를 위해 농업부문, 식품가공부문, 가계부분으로 나누어 각 부문별 질소와 인산의 양분수지 분석은 물론 구리·철·납·카드뮴 등의 배출량 산출결과도 제시하였다.¹⁹⁾ Krug와 Winstanley는 미국 미시시피 지역을 대상으로 질소수지를 기초로 한 물질균형분석을 시도하였고, 이러한 분석모형을 기초로 옥수수와 대두의 윤작시스템이 질소수지에 미치는 영향에 대한 분석결과도 제시하였다.²⁰⁾ Pacini et al.은 물질균형 분석을 이용하여 관행농법, 유기농법, 종합농업 등 농법별 양분수지 및 유출, 생물다양성 등 환경부하에 미치는 영향에 관한 체계적인 분석을 시도하였다.²¹⁾ 최근 국가적인 규모의 질소수지 연구는 2001년도 질소수지 분석을 통한 질소배출량의 추정,¹⁴⁾ 2005년 대한민국 질소 유입 및 유출 수치²⁾와 2008년도 대한민국 질소수지 연구³⁾가 진행되었으며, 농업 및 축산업지역의 질소 유입과 아산화질소(N₂O)량을 포함한 대기로의 유출이 현저하게 많은 것으로 보고되었다(Fig. 1). 하지만 국가적인 질소수지 연구와 농경지 특정 지역에서 질소수지 연구에 집중된 관계로 국내 전체의 농업 및 축산업지역에서의 보다 정확하고 자세한 질소수지를 위한 연구는 아직 기초단계에 머물고 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 국내 농업 및 축산업에서의 질소수지 경향을 파악하는 것을 목표로 하였으며 농경지에 총 유입되는 질소량을 고려한 N₂O발생량을 지자체별로 평가하고자 하였다. 본 연구는 향후 장기적으로 국내 농업 및 축산업지역의 질소를 관리하는 정책 및 방안에 있어서 추구하여야 할 목표를 수립하는데 도움을 줄 것으로 사료된다.

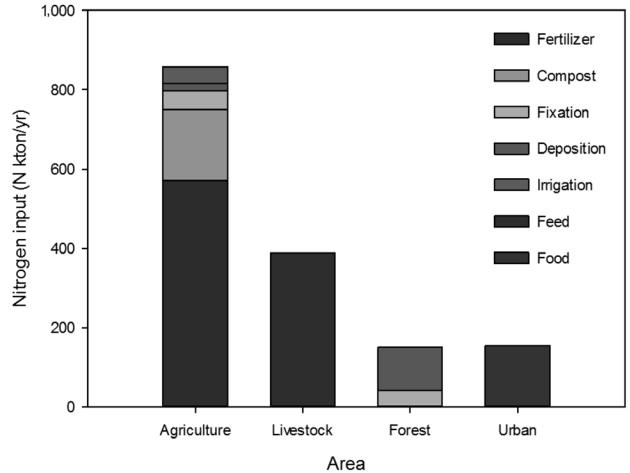


Fig. 1. Input of nitrogen for agricultural area, livestock, forest and urban in South Korea by Nam et al.

2. 연구방법

우리나라 질소수지 연구 자료를 기초로 환경부, 농림수산부, 국토해양부 등의 산하기관에서 발간한 2010년 통계자료를 이용하여 농업 및 축산업지역에서의 질소수지 분석을 하였다.²²⁻²³⁾ 농업지역은 경작이 이뤄지는 논과 밭으로 세분화하였으며 축산업지역은 축산업종을 대상으로 구분하였다. 질소수지를 정량화하고 보편적으로 활용하기 위해서 일반적인 평균값 및 중간값을 주로 사용하였으며, 총 질소 수지량의 기본 단위는 기존연구에서 많이 사용하는 N kg/ha/yr와 총량은 N ton/yr로 나타내었다. 농업 및 축산업지역에서의 질소수지 파악을 위한 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다.

2.1. 질소 유입

농업지역의 작물생산을 위한 질소질 화학비료에 의한 토

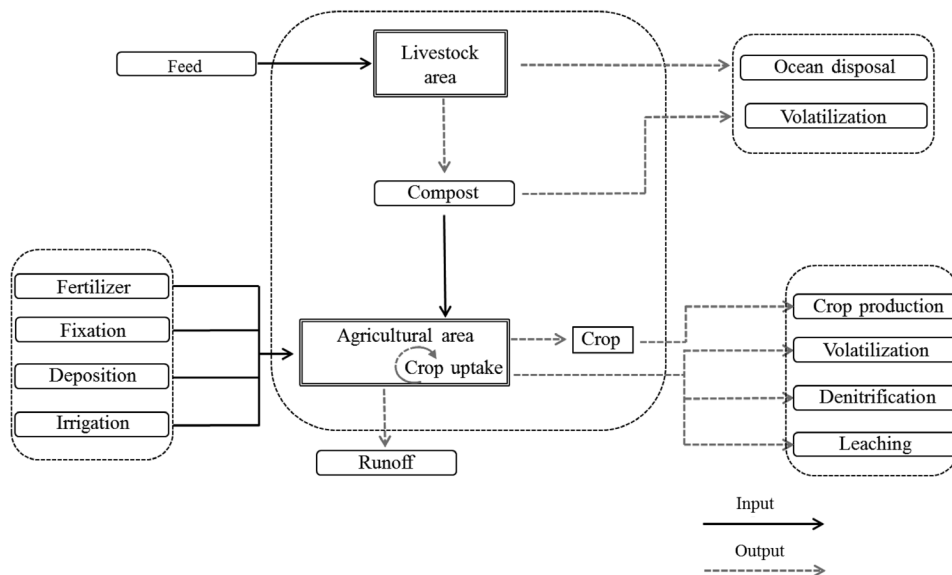


Fig. 2. Input and output for nitrogen balances in agriculture and livestock.

양 내 유입량, 건식 및 습식을 포함한 대기로부터의 질소 침착량, 질소고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량, 미처리된 가축분뇨에 의한 유입 및 퇴비로의 재사용량, 관계용수에 의한 토양으로 질소 유입을 고려하였다. 축산업지역은 가축생산을 위한 가축사료를 통한 유입을 대상으로 산출하였다.

2.2. 질소 유출

농업지역에서 질소의 유출은 연간 생산된 농작물 내의 질소함유량, 농경지 작물 질소 흡수량, 질소질 화학비료 사용량에 따른 토양에서의 탈질량과 휘발량, 지하수 유출량을 고려하였다. 축산업에서는 가축사료를 이용한 가축생산과정으로부터 부산물로 가축분뇨가 발생하며 발생된 가축분뇨는 퇴비화와 액비화 등 자원화방법에 의해 적절하게 처리되거나 해양 투기된다. 그러므로 축산업에서 유출은 가축 분뇨 발생량 중 휘발되거나 탈질되는 양, 퇴비로 재사용된 양, 그리고 가축분뇨 해양투기에 의한 유출을 대상으로 산출하였다.

2.3. 농경지에서의 아산화질소(N₂O) 직접배출량 평가 방법

농경지에서 아산화질소(N₂O)배출은 가장 중요한 배출원이며, 작물생산을 위해 농경지에 사용되는 질소의 양이 증가할수록 늘어나며 농업 생태계로 유입되는 질소원으로는 질소질 화학비료 사용, 생물학적 고정, 작물 잔사의 재활용, 하수 오니의 사용 등이 있다. 농경지에서의 N₂O 직접배출량 산정을 위하여 2006년 IPCC 가이드라인²⁴⁻²⁶⁾에 따라 식(1)을 이용하여 지자체별로 평가하였다.

N₂O 직접배출

$$= [(F_{SN} + F_{AN} + F_{BN} + F_{CR}) \times EF_1] + F_{OS} \times EF_2 \quad (1)$$

여기서, EF₁ : 농경지에서 투입된 질소 중 아산화질소로 직접 배출되는 계수

EF₂ : 토양 경작에 의해 아산화질소로 배출되는 계수

F_{SN} : 화학비료로 공급되는 질소량(kg/yr)

F_{AN} : 축산분뇨로 배설되는 질소 중에서 방목에 의해 생산되는 분뇨와 NH₃나 NO_x로 휘산된 질소를 제외하고 비료로 사용된 질소량(kg/yr)

F_{BN} : 질소고정작물에 의해 고정된 질소량(kg/yr)

F_{CR} : 토양으로 환원되는 작물 잔사에 의해 공급되는 질소량(kg/yr)

F_{OS} : 경작되는 토양 면적(ha)

지자체별 N₂O 직접배출량 산정을 위해 질소질 화학비료로 공급되는 질소량(F_{SN})은 2010년 전체 유입되는 질소질 화학비료 사용량을 지자체별 경지이용면적으로 나누어 산출하였으며 그 외 질소량 자료는 문헌에 보고된 자료를 취합하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 주요 통계 및 문헌자료

우리나라 2010년 국토면적은 10,003,307 ha이며 16개 시·도 중 경상북도가 전 국토의 19%인 1,902,802 ha로 가장 넓으며, 광주광역시 가장 작은 면적으로 국토의 0.5%인 50,124 ha로 파악되었다. 2010년 지목별 이용현황 중, 농작물

Table 1. The difference between 2009 and 2010 of agricultural area in South Korea

Item	2009(A)		2010(B)		Increment(B-A)	
	Paddy (ha)	Upland (ha)	Paddy (ha)	Upland (ha)	Paddy (ha)	Upland (ha)
Country	1,010,287	726,511	984,140	731,161	-26,147	4,650
Seoul	536	804	318	612	-218	-192
Busan	5,025	2,586	4,647	2,689	-378	103
Daegu	5,186	4,458	4,667	4,596	-519	138
Incheon	14,281	6,349	13,662	6,744	-619	395
Gwangju	7,560	3,762	7,302	3,793	-258	67
Daejeon	2,131	2,700	2,041	2,725	-90	25
Ulsan	7,454	4,546	7,209	4,445	-245	-101
Gyeonggi	103,939	79,527	101,896	79,780	-2,043	253
Gangwon	43,869	67,778	43,190	67,982	-679	204
Chungbuk	52,994	65,925	50,999	65,974	-1,995	49
Chungnam	172,136	65,545	169,081	64,650	-3,055	-895
Jeonbuk	146,164	59,504	143,222	60,677	-2,942	1,173
Jeonnam	198,874	110,929	194,764	112,497	-4,110	1,568
Gyeongbuk	144,150	134,515	141,005	135,228	-3,145	713
Gyeongnam	105,930	58,192	100,104	59,547	-5,826	1,355
Jeju	58	59,425	33	59,222	-25	-205

재배를 목적으로 하고 현실적으로 재배가 가능한 논외의 경지면적은 984,120 ha이며, 밭의 경지면적은 731,161 ha로 조사되었다(Table 1). 논 면적은 지난해 1,010,287 ha보다 26,167 ha 감소하였으며 밭 면적은 지난해 726,511 ha보다 4,650 ha 증가하였다. 논 감소 및 밭의 증가는 쌀보다 수익성이 높은 인삼, 고추, 과수 등의 재배로 논을 밭으로 전환하는 면적이 많아졌으며 농산물 수입에 따른 이농현상 및 고속도로 확충, 신도시 및 국토개발 등으로 국토 보전보다는 이용·개발정책에 중점을 두었던 것으로 파악된다. 2010년의 인구는 48,875천 명이며 2000년 이후로 고령화 및 저출산으로 인하여 인구성장률이 둔화되고 있는 것으로 조사되었다.

농업 및 축산업의 가축두수 및 사료량, 질소질 화학비료 사용량, 해양투기량 등 질소수지에 필요한 모든 자료는 관련 행정부처인 농촌진흥청, 환경부, 통계청, 농림수산식품부, 해양경찰청 등의 자료를 취합하여 2010년 농업 및 축산업의 질소수지 연구에 사용하였다. 그 외 침착물, 휘산물, 탈질물 등의 자료는 문헌에 보고된 자료를 취합하여 평균값 및 중간값을 사용하였다. 본 연구에 적용된 값들은 Table 2와 같다.

3.2. 질소 유입

2010년 농업활동에 의하여 유입되는 질소는 연간 질소질 화학비료사용량, 생물학적 질소 고정량, 대기 중으로부터 강우나 분진의 형태로 침착되는 양, 관개용수에 의한 연간 총 질소유입량으로 결정하였다.

Table 2. Input and output of nitrogen considered for nitrogen application rate

Item	Application rate	Reference
Paddy field fixation	35 kg/ha/yr	Ortiz et al., 2006; Gang et al., 2008
Upland fixation	15 kg/ha/yr	RDA, 2011; Choi et al., 2008
Paddy field deposition	11 kg/ha/yr	Lee et al., 2002; Leip et al., 2011
Upland deposition	11 kg/ha/yr	Nam et al., 2011; Cherry et al., 2011
Irrigation flow rate	43.84 kg/ha/yr	RDA, 2011; Kim et al., 2010
Denitrification of Paddy field	30~70 kg/ha/yr	Kallenbacj et al., 2010; Parfitt et al., 2006
Denitrification of Upland	30 kg/ha/yr	Cao et al., 2006; Bashkin., 2002
Protein in feed	15%	KHIDI, 2011; Yoon et al., 2008
Nitrogen in protein	16%	KHIDI, 2011; Yoon et al., 2008
Livestock manure of waste	27.6%	MOE, 2011
Crop uptake	61.7%	Park et al., 2010
Volatilization of agricultural	16.5%	Kim et al., 2009; Medinga et al., 2007
Leaching	2.45%	No et al., 2009; Kaushal., 2011

Table 3. Atmospheric deposition and biological fixation of agricultural area

Item	Area (ha)	Application rate (kg/ha/yr)	Total input (ton/yr)	
Atmospheric deposition	Paddy	984,140	11	10,825
	Upland	731,161	11	8,042
Biological fixation	Paddy	984,140	35	34,444
	Upland	731,161	15	10,967

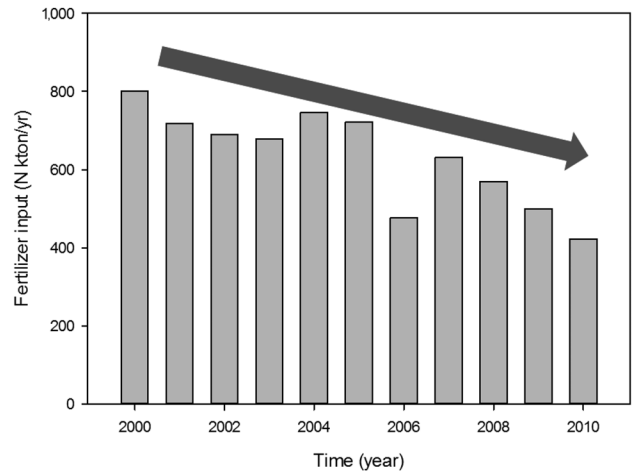


Fig. 3. Annual use of chemical fertilizer in South Korea.

질소질 화학비료에 의한 유입량은 2005년 질소질 화학비료 보소가 완전 폐지됨에 따른 일시적 사전구매로 722,000 N ton/yr까지 증가하였으나, 2007년 친환경 농업 확대 등으로 인해 631,000 N ton/yr으로 감소, 2008년은 화학비료 가격의 큰 폭 인상 등으로 570,000 N ton/yr으로 감소하였다. 2010년 맞춤형비료 지원 등으로 질소질 화학비료에 의한 유입량은 총 423,000 N ton/yr으로 점차 감소하고 있는 추세인 것으로 나타났다(Fig. 3).

대기 중으로부터 농경지에 침착되는 양인 11 N kg/ha/yr²⁷⁾을 통하여 논과 밭에서 침착되는 양을 추정할 결과 10,825 N ton/yr와 8,042 N ton/yr으로 산출되었다. 또한, 전체 침착량 중 건조침착상태가 30%이고 강우에 의해 침착되는 양이 70%라 추정하면²⁷⁾ 56,604 N ton/yr이 건조상태로 침착되었으며 132,076 N ton/yr이 습식상태로 침착되었다. 농경지 내, 질소고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량은 여러 문헌^{2,3,13,28-30)}들을 조사하여 논과 밭에서의 질소 고정량인 35 N kg/ha/yr와 15 N kg/ha/yr를 이용하였다. 산출된 논과 밭에서 생물학적 총 질소 고정량은 연간 34,444 N ton/yr, 10,967 N ton/yr이다.

관개용수의 수원으로 하천, 저수지, 지하수 등으로 나누며 관개용수 중의 질소함량은 환경부 물환경정보시스템의 하천수와 호소수, 농업용수 수질측정망 자료³¹⁾와 농업용수 수질조사서 연구 자료³²⁾를 바탕으로 전국 평균값 4.7 mg/L로 산출하였다. 관개용수 사용량 160억 ton/yr과 총 경지면적 1,715,301 ha을 감안하여 관개용수에 의한 질소 유입비율은 43.84 kg/ha/yr로 산출하였으며 이는 기존 문헌³³⁻³⁶⁾에서 조사

Table 4. Estimated nitrogen in agricultural production of South Korea in 2010

	Annual production	g protein/kg	Nitrogen (ton)
	2010		
Rice	4,295,413	88	60,479,41504
Wheat & Barley	120,332	92	1,771,28704
Misce-llaneous	7,894,390	106	1,447,84128
Potatoes	2,489,151	22	760,5136
Pulses Grains	119,288	330	6,298,4064
Fruits	2,489,151	6	2,389,58496
Vegetables	7,894,390	15	18,946,536
Total	-	-	92,093,58432

된 15.2~49.9 kg/ha/yr에 적합하게 나타났다. 따라서 관개용수에 의한 질소유입량은 75,200 N ton/yr로 추정하였다.

2010년 사육 축산종 소(젖소, 한우), 말, 돼지, 양, 사슴, 닭, 오리, 개의 가축분뇨 발생량은 43,700,000 ton/yr³⁷⁾으로 하루 119,726 ton/day의 가축분뇨가 발생하였다. 축산농가의 97.6%가 축산분뇨처리시설을 갖추었으며, 정상적으로 가동하는 처리시설은 97.5%로 조사되었다.³⁸⁾ 축산폐수를 발효 및 퇴비로 만드는 퇴비화 시설은 79.6%, 축산폐수를 저장, 처리하여 액체상의 비료로 만드는 액비화 시설이 3.5%, 퇴·액비로의 자원화 처리시설은 8.5%를 차지하였으며 축산분뇨의 정화시설은 8%를 차지하였다. 가축분뇨 중 질소 발생량은 2008년 가축분뇨 양분발생량,³⁹⁾ 가축증가율²²⁾과 2010년 해양투기 된 축산분뇨³⁷⁾를 고려하여 산출하였다. 생분뇨는 275,938 ton/yr이며 자원화 과정에서 40%질소 휘발량을 제외한 퇴·액비로 인한 농업지역 유입량은 165,563 N ton/yr로 추정하였다. 가축분뇨는 수질오염원 중 가장 중요한 비점오염원으로서 관리되고 있다. 특히 처리시설을 갖추지 않고 소규모로 전통적 방식으로 사육하는 가구가 많아 관리가 어려운 오염원이며 가축분뇨의 이용을 확대함으로써 수질오염을 줄이는 한편, 양질의 비료를 생산함으로써 “자원순환형 친환경 축산기반 구축”에 매우 중요한 분야이므로 처리부분도 주요 관심의 대상이다. 신고, 허가 규모 이상 농가에서의 자원화 처리는 대부분 퇴비, 액비로 자원화 처리하고 있지만 가축분뇨 처리를 규제하지 않고, 신고하지 않은 농가까지 포함하면 이보다 더욱 많은 양으로 추정된다.

축산업에서 질소유입은 가축사료를 통한 유입을 대상으로 산출되었다. 2010년 국내에서 소비된 사료량은 17,533,629 ton/yr⁴⁰⁾이며, 사료 내 단백질 함량 15%⁴⁰⁾와 단백질 내 질소 함량 16%⁴⁰⁾을 고려하여 축산업으로 유입된 질소는 420,807 N ton/yr로 산출하였다. 축산업의 사료 소비량은 가축두수의 증가로 인하여 매년 증가하고 있는 추세인 것으로 조사되었다.

따라서 2010년 농업 및 축산업지역의 질소의 총 유입은 1,148,850 N ton/yr으로 추정되며, 이중 43%가 토양에 뿌려진 비료 및 퇴비이며, 축산업지역의 유입된 사료의 양이 36%이지만 축산분뇨로 처리되고 거의 재사용 되므로 질소 오염에 직접적인 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

3.3. 질소 유출

농업 및 축산업지역의 질소 유출량은 질소질 화학비료와 가축분뇨로부터 대기 중 암모니아 질소로 휘발되거나 탈질되는 양, 질소질 화학비료 주입에 의해 생산된 작물에 함유되는 양, 가축사료에 의하여 가축분뇨의 형태로 배출되는 양, 축산물로 생산되어 생활계로 유출되는 양, 그리고 나머지는 잔류되거나 축적되어 비점오염으로 유출되는 양을 추정하였다.

농업지역에서의 탈질되는 질소량을 산출하기 위하여 논과 밭에서 탈질되는 양과 질소질 화학비료 사용량에서 탈질되는 양을 각각 산출하여 평균값을 사용하였다. 논에서 탈질되는 양은 30~70 N kg/ha/yr^{41,42)}와 질소질 화학비료사용량 대비 32%^{11,43)}가 탈질 된다고 보고되었다. 두 가지 방법으로 탈질되는 양을 산정하여 보면 논에서 탈질되는 양은 49,207 N ton/yr이며, 질소질 화학비료사용량 대비 탈질량은 135,360 N ton/yr로 산출되며, 평균값인 92,283 N ton/yr이 논에서 탈질되는 것으로 추정하였다. 밭은 30 N kg/ha/yr^{41,42)}가 탈질되며 질소질 화학비료사용량 대비 15%^{11,43)}가 탈질된다고 알려져 있다. 이를 적용하면 밭에서 탈질되는 양과 질소질 화학비료사용량 대비 탈질되는 양은 21,934 N ton/yr와 63,450 N ton/yr로 산출되며, 본 연구에서는 평균값인 42,692 N ton/yr이 밭에서 탈질되는 것으로 추정하였다.

질소의 휘발은 주로 농업지역에서 질소질 화학비료에 의한 휘발, 가축분뇨에 의한 휘발량 등이 있으며 기타 발생할 수 있는 질소 휘발량은 그 양이 극히 적으므로 무시하였다. 2010년 농업지역에서 유입된 질소질 화학비료 시비량은 423,000 N ton/yr이며 시비량의 16.5%가 휘발⁴⁴⁾되므로 그 양은 69,795 N ton/yr으로 산출하였다.

농업지역에서 토양표면으로 유입된 질소가 토양을 통해 지하수로 유출되는 양은 유입된 총 질소의 1.6~3.3%^{33,36)}정도로 평균값인 2.45%를 이용하면 총 178,37 N ton/yr이 지하로 유출되는 것으로 나타났다.

작물을 생산하기 위해서는 질소, 인 등의 영양성분이 다량 필요하며, 토양이나 관개수 등 자연에 의한 공급량만으로는 적정량의 생산량을 확보할 수 없어 그 부족분을 질소질 화학비료로서 투입한다. 이때 과량의 질소질 화학비료를 투입하면 작물이 흡수되고 남는 잔여분이 토양에 집적되거나 수계로 유출되어 오염원으로 작용할 수 있다. 질소의 작물 흡수는 강우량, 비료량, 기후 등에 많은 영향을 받으므로 작물에 의한 영양물질 흡수량은 연간 생산된 농산물 내 질소함량과 경작지의 질소 흡수량을 이용하여 평균 질소 흡수량을 산정하였다. 2010년 미곡, 맥류, 잡곡, 서류, 두류, 과일류, 채소류의 생산량은 15,219,997 ton/yr이며 작물 내 단백질함량과 단백질 내 질소함량을 고려하여 연간 생산된 농산물 내 질소함량 92,093 N ton/yr으로 산출하였다. 또한, 경작지로 유입질소의 61.7%가 흡수되므로 작물 흡수로 유출된 질소량은 449,202 N ton/yr이다. 따라서 평균값인 270,648 N ton/yr로 산출되었다.

축산업에서의 질소유출은 퇴비에 의한 휘발량과 축산분

노 해양투기에 의한 유출량을 산정하였다. 2010년 가축분뇨 양분발생량, 가축 증가율과 해양투기를 고려한 생분뇨는 275,938 N ton/yr이며 자원화 과정에서 질소양분의 약 40%^{2,3,14)}인 110,375 N ton/yr가 휘발되는 것으로 추정되었다. 2010년 가축분뇨 발생량은 43,700,000 ton/yr³⁷⁾으로 조사되었으며 당해 해양투기 된 축산분뇨는 1,069,000 ton/yr이다. 질소의 휘발된 양 없이 모두 해양투기 되었다고 하였을 때 유출된 질소는 6,750 N ton/yr로 산출하였다. 2006년 가축분뇨에서 발생한 폐기물을 바다에 버릴 수 없게 한 ‘런던협약’에 가입한 후 2012년부터 해양투기를 금지하기로 하였다. 가축분뇨 해양투기는 2006년 2,607,000 ton/yr에서 2009년 1,171,000 ton/yr로 줄고 있으며 2010년 700,000 ton/yr로 줄고 2011년 말까지 해양배출을 ‘0’으로 만들 계획이었다. 하지만 분뇨를 비료(퇴비, 액비)로 만들어 작물 경작지에 뿌려야 하는데 2010년 발생한 구제역과 잦은 비로 목표를 달성하지 못했다.

3.4. 농경지에서의 아산화질소(N₂O) 직접배출량 평가

지구온난화를 유발하는 기체 중 CO₂ 다음으로 중요한 온실가스인 N₂O는 농업활동에 의한 인위적 배출량이 70%에 달하는 것으로 알려져 있다. 질소사용에 따른 아산화질소 직접배출량 평가에는 Cole et al, Mosier et al이 사용한 전환계수들이 사용된다.⁴⁵⁻⁴⁷⁾ 이 계수들은 농경지에 사용된 질소의 0.003~0.03 (0.3~3%)이 직접 아산화질소(N₂O)로 배출된다는 결과를 근거로 한 것이며, 2006년 IPCC는 이를 바탕으로 가이드라인에서 농경지에 투입된 질소 중 N₂O로 직접 배출되는 계수(EF₁)로서 0.01 N₂O-N kg/N kg를 제시하고 있다.²⁴⁻²⁶⁾ 그리고 2 N kg/ha/yr를 토양경작에 의한 N₂O 배출계수(EF₂)의 기본 값²⁴⁻²⁶⁾으로 정하고 있으며 Table 5에서

Table 5. Factors correlating with N₂O emission from agricultural area of local government

	FSN (ton/yr)	FAN (ton/yr)	FBN (ton/yr)	FCR (ton/yr)	FOS (ha)
Seoul	229	191	20	146	930
Busan	1,809	1,510	202	1,157	7,336
Daegu	2,284	1,907	232	1,461	9,263
Incheon	5,032	4,201	579	3,219	20,406
Gwangju	2,736	2,284	312	1,750	11,095
Daejeon	1,175	981	112	752	4,766
Ulsan	2,874	2,399	318	1,838	11,654
Gyeonggi	44,802	37,409	4,763	28,665	181,676
Gangwon	27,415	22,891	2,531	17,541	111,172
Chungbuk	28,846	24,086	2,774	18,456	116,973
Chungnam	57,369	47,858	6,887	36,879	233,731
Jeonbuk	50,282	41,985	5,922	32,172	203,899
Jeonnam	75,772	63,269	8,504	48,481	307,261
Gyeongbuk	68,120	56,880	6,963	43,585	276,233
Gyeongnam	39,371	32,874	4,396	25,190	159,651
Jeju	14,613	12,201	889	9,349	59,225

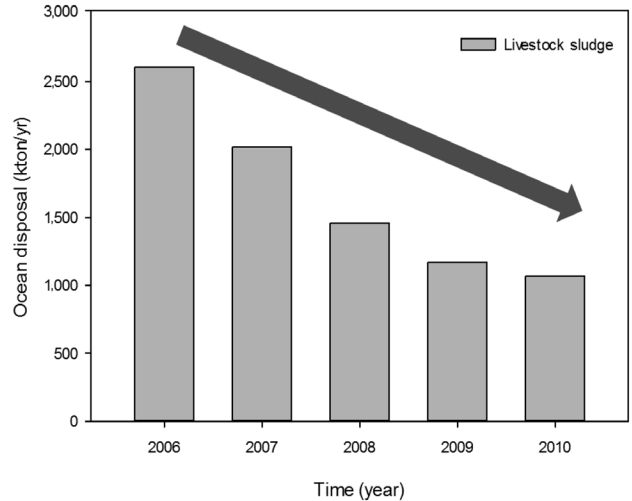


Fig. 4. Livestock sludge disposed in ocean in South Korea.

의 질소질 화학비료로 공급되는 질소량(F_{SN}), 동물 배설물에서 나오는 질소량(F_{AN}), 질소고정에 의한 질소량(F_{BN}), 작물잔사 사용에 의한 질소공급량(F_{CR}), 경작되는 토양 면적(F_{OS})을 고려하여 지자체별로 평가하였다.

Fig. 5에서 전라남도가 2,574 ton/yr로 N₂O 배출량이 가장 높으며, 서울이 7 ton/yr로 가장 낮다. Kallenbach et al은 토양 수분함량과 N₂O 배출과의 관계는 양의 상관관계가 있어서, 토양수분함량이 적을수록 배출이 감소한다고 하였다.⁴⁸⁾ 그러므로 N₂O 배출이 많은 지역에서는 농경지에서의 토양 수분함량 조절을 고려하는 기술적용을 고려해 볼 만하다. 이러한 기술의 예로는 관개 방식을 고랑관개에 비해 투수속도가 느린 점적관개의 활용, 화학비료 사용 시 dicyandiamide (C₂H₄O₄)와 같은 질산화 억제제를 추가 등의 방법들이 있다. 하지만, 토양수분함량 조절에 의한 토양온도, 토양 내 질소량의 변화가 N₂O 배출에 밀접한 영향이 있으므로 인위적으로 조절이 불가능한 토양온도를 제외하고 토양수분과 토양 내 질소량에 의한 N₂O 배출에 영향을 주는 특성을 파악해야 한다.

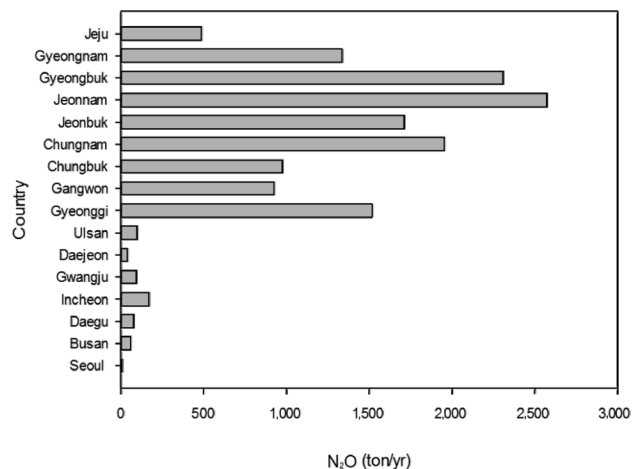


Fig. 5. Nitrous oxide emission in 16 local governments.

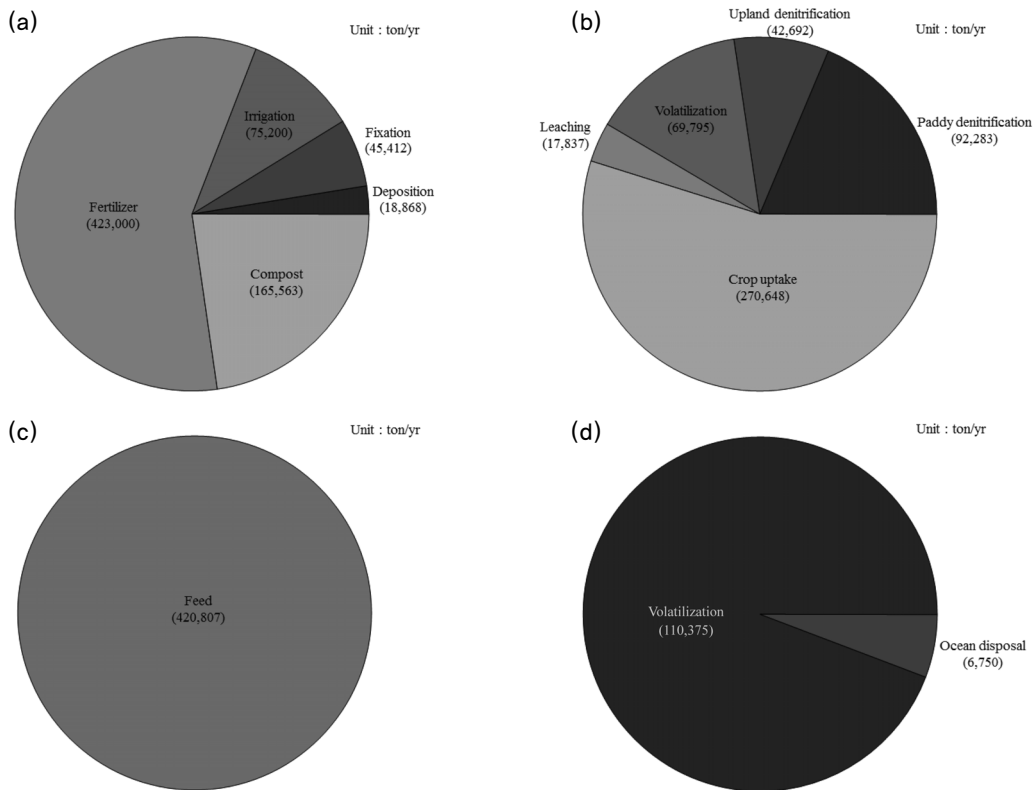


Fig. 6. Nitrogen Budget for (a) input of agricultural area, (b) output of agricultural area, (c) input of livestock, and (d) output of livestock.

3.5. 농업 및 축산업지역 질소 수지 비교

2010년 농업 및 축산업지역의 질소 유출입 수지를 Fig. 6에 나타내었다. 농업지역의 질소의 총 유입량과 유출량은 728,043 N ton/yr과 493,255 N ton/yr으로 산정되었으며 질소질 화학비료에 의한 유입량이 N 423,000 ton/yr로 농업지역 전체 유입의 58%를 차지하였다. 대기로부터 질소 침착, 생물학적 고정, 관개용수로 139,480 N ton/yr의 질소가 유입됐으며, 유입 질소 중 지하수유출, 작물흡수와 탈질로 423,460 N ton/yr이 유출되었다. 축산업에서의 사료로 인한 가축들의 질소유입은 420,807 N ton/yr으로 이중 117,125 N ton/yr이 휘발 또는 해양유출로 직접적인 수지 유출량이 되며 165,563 N ton/yr은 퇴비로 재사용된 것으로 확인되었다.

농업 및 축산업 지역의 질소수지를 비교했을 때, 질소의 유입이 많으며 강우 시 강이나 토양지하수로 흘러 들어가 오염의 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 농경지별 토양비옥도, 작물의 생육상태, 수확량 등의 정보를 수집하고 작물별 생육모델분석, 처방시스템을 개발하여 토지별 필요한 양의 질소질 화학비료 및 퇴비 등을 살포하는 농업기술을 적극 활용하고 하천변에 인위적으로 조성되는 수변완충구역을 잘 활용하는 것이 필요하다.

2005²⁾, 2008³⁾, 2010년도 농업 및 축산업지역의 질소수지를 비교 및 분석한 결과, 2008년 총 유입된 질소는 2005년보다 141,128 N ton/yr이 저감되었으며 2010년 총 유입된 질소는 2008년 질소수지 보다 97,526 N ton/yr이 저감된 것으로 조사되었다(Fig. 7). 2005년부터 친환경농업확대, 가축분

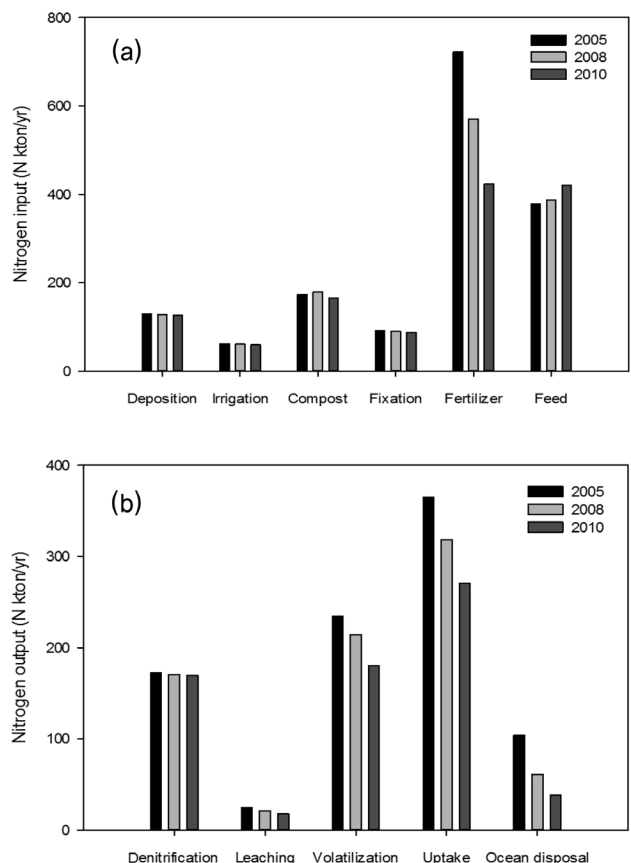


Fig. 7. Comparison of nitrogen budget between the present research and the previous researches.

노 퇴비 등 유기질비료에 대한 지원확대로 인하여 질소질 화학비료에 의한 유입이 299,000 N ton/yr으로 저감되었으며 토양검정결과를 고려한 맞춤형비료지원을 통하여 질소질 화학비료에 의한 유입은 더 감소할 것으로 예상된다. 논 면적 감소로 인하여 대기로부터 질소 침착, 생물학적 고정에 의한 질소의 유입은 감소하고 있으며 쌀보다 수익성이 높은 인삼, 고추, 과수 등의 재배로 논을 밭으로 전환하는 면적이 늘어나 밭에서의 대기로부터 질소 침착, 생물학적 고정에 의한 유입은 증가하고 있는 추세이다. 논과 밭의 총 경지면적은 도로건설, 도시확장 등에 따른 감소 추세가 지속되므로 질소의 유입량은 감소할 것으로 판단된다. 가축 사육두수의 소폭증가로 인하여 소비되는 사료에 의한 유입이 증가하였으며 이로 인하여 가축분뇨 발생량도 증가하였다. FTA 체결로 향후 사육두수 감소로 인하여 가축사료에 의한 질소 유입은 감소할 것으로 예상된다.

2008년 총 유출되는 질소는 2005년 질소수지 보다 113,307 N ton/yr이 저감되었으며 2010년 총 유출된 질소는 2008년 질소수지 보다 124,100 N ton/yr이 저감된 것으로 나타났다. 벼 재배면적 감소, 품질 고급화의 영향, 기상여건 악화로 인한 채소류 및 과실의 생산량감소로 인하여 작물생산에 의한 질소 유출량은 감소한 것으로 조사되었으며 건강에 대한 관심 증대로 잡곡·과일류 등 대체식품의 소비량이 증가하고 서구화에 의한 결식횟수 증가 등 영향으로 쌀 소비량은 지속적으로 감소할 것으로 예상된다. 가축분뇨 해양투기에 의한 질소 유출은 2005년 15,647 N ton/yr에서 2010년 6,750 N ton/yr로 8,897 N ton/yr이 저감되었다. 2006년 가축분뇨에서 발생한 폐기물을 바다에 버릴 수 없게 한 ‘런던협약’에 가입한 후 2012년부터 해양투기를 금지하기로 하였으며 이로 인해 가축분뇨 퇴·액비 등의 자원화 확대등과 같은 정부시책변화에 따라 질소수지에 상당한 영향을 줄 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 농업 및 축산업에서의 질소수지 경향을 파악하는 것을 목표로 하였으며 농경지에 총 유입되는 질소량을 고려한 N_2O 발생량을 지자체별로 평가하였다. 2010년 농업 및 축산업에서의 유입된 총 질소량은 1,148,848 N ton/yr이었으며, 농업지역에서의 질소 유입은 728,043 N ton/yr으로 질소질 화학비료로 인한 유입이 58%를 차지하였다. 생물학적 고정, 대기로부터 질소 침착, 관개용수로 139,480 N ton/yr의 질소가 유입됐으며, 유입 질소 중 지하수유출, 휘발, 작물흡수와 탈질로 493,255 N ton/yr이 유출되었다. 축산업지역에서의 질소유입은 420,807 N ton/yr이며 휘발과 해양투기를 고려한 117,125 N ton/yr이 유출되는 것으로 나타났다.

농업 및 축산업 지역의 질소수지를 비교했을 때, 질소의 유입이 많으며 강우 시 강이나 토양지하수로 흘러 들어가 오염의 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 농경지별 토양비

옥도, 작물의 생육상태, 수확량 등의 정보를 획득하고 작물별 생육모델분석, 처방시스템을 개발하여 토지별 필요한 양의 질소질 화학비료 및 퇴비 등을 살포하는 농업이 이루어져야 하며 하천변에 인위적으로 조성되는 수변완충구역을 잘 활용하는 것이 필요하다.

2005, 2008, 2010년도 농업 및 축산업지역의 질소수지를 비교 및 분석한 결과, 2008년 총 유입된 질소는 2005년 보다 141,128 N ton/yr이 저감되었으며 2010년 총 유입된 질소는 2008년 질소수지 보다 97,526 N ton/yr이 저감된 것으로 조사되었다. 2005년부터 친환경농업확대, 가축분뇨 퇴비 등 유기질비료에 대한 지원확대로 인하여 질소질 화학비료에 의한 유입이 299,000 N ton/yr으로 저감되었으며 토양검정결과를 고려한 맞춤형비료지원을 통하여 질소질 화학비료에 의한 유입은 더 감소할 것으로 예상된다. 논 면적 감소로 인하여 대기로부터 질소 침착, 생물학적 고정에 의한 질소의 유입은 감소하고 있으며 쌀보다 수익성이 높은 인삼, 고추, 과수 등의 재배로 논을 밭으로 전환하는 면적이 늘어나 밭에서의 대기로부터 질소 침착, 생물학적 고정에 의한 유입은 증가하고 있는 추세이다.

2008년 총 유출되는 질소는 2005년 질소수지 보다 113,307 N ton/yr이 저감되었으며 2010년 총 유출된 질소는 2008년 질소수지 보다 124,100 N ton/yr이 저감된 것으로 나타났다. 벼 재배면적 감소, 품질 고급화의 영향, 기상여건 악화로 인한 채소류 및 과실의 생산량감소로 인하여 작물생산에 의한 질소 유출량은 감소한 것으로 조사되었으며 건강에 대한 관심 증대로 잡곡·과일류 등 대체식품의 소비량이 증가하고 서구화에 의한 결식횟수 증가 등 영향으로 쌀 소비량은 지속적으로 감소할 것으로 예상된다. 2006년 가축분뇨에서 발생한 폐기물을 바다에 버릴 수 없게 한 ‘런던협약’에 가입한 후 가축분뇨 해양투기에 의한 질소 유출은 감소하고 있으며 2012년부터 해양투기를 금지하기로 하였으며 이로 인해 가축분뇨 퇴·액비 등의 자원화 확대등과 같은 정부시책변화에 따라 질소 흐름에 영향을 줄 것으로 판단된다.

농경지에 총 유입되는 질소량을 고려한 N_2O 발생량을 지자체별로 평가하였다. 전라남도가 2,574 ton/yr로 N_2O 배출량이 가장 높으며, 서울이 7 ton/yr로 가장 낮다. N_2O 발생량이 많은 지역에서는 농경지 관개 방식을 고랑관개에 비해 투수속도가 느린 점적관개의 활용, 화학비료 사용 시 dicyandiamide ($C_2H_4O_4$)와 같은 질산화 억제제 추가 등의 적극적인 대책을 고려해 볼 만 하다.

농업지역 유출 질소의 토양 흡수량 및 축적량, 축산업 지역의 지하수 유출량 등에 관한 연구가 미흡하여 제시 못하였기 때문에 여기에 대한 연구와 결과가 보완되면 보다 정확한 수지를 산출할 수 있을 것으로 판단되며 본 연구에서 수행되었던 지자체별 N_2O 평가뿐만 아니라 지자체 농업 및 축산업지역의 질소 유입 및 유출 수지를 연구하여 포괄적인 질소 수지 관리가 필요할 것으로 본다.

참고문헌

- Scolow, R. H., "Nitrogen management and the future of food : Lessons from management of energy and carbon," Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America, **96**, 6001~6008(1999).
- 윤동민, 박신형, 박재우, "2005년 대한민국 질소 유입 및 유출 수지," 대한환경공학회지, **30**(1), 97~105(2008).
- 남역현, 안상우, 박재우, "2008년도 대한민국 질소수지 연구 : 비점오염증가 및 N₂O발생량 산정," 대한환경공학회지, **33**(2), 103~112(2011).
- Kim, S. D. and Dale, B., "Effects of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions and economics of corn production," *Environ. sci. technol.*, **42**, 6028~6033(2008).
- Goolsby, D. A., Battaglin, W. A., Aulenbach B. T. and Hooper, R. P., "Nitrogen input to the Gulf of Mexico," *Environ. Qual.*, **30**(2), 329~336(2001).
- Inventory of U.S., "Greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2005," EPA 430-R-07-002.
- 신동석, "비점오염원 원단위 개정을 위한 조사연구 방향," 한국물환경학회지, **23**(4), 429~433(2007).
- Leip, A., Britz, W., Weiss, F., Vries, W., "Farm, land, and soil nitrogen budgets for agriculture in Europe calculated with CAPRI," *Environ. Pollut.*, 1~11(2011).
- Vries, W., Leip, A., Reinds, G. J., Kros, J., Lesschen, J. P. and Bouwman, A. F., "Comparison of land nitrogen budgets for European agriculture by various modeling approaches," *Environ. Pollut.*, 1~15(2011).
- Ammann, C., Spirig, C., Leifeld, J. and Neftel, A., "Assessment of the nitrogen and carbon budget of two managed temperate grassland fields," *Agric., Ecosystems and Environ.*, **133**, 150~162(2009).
- Bashkin, V. N., Park, S. U., Choi, M. S. and Lee, C. B., "Nitrogen budgets for the Republic of Korea and the Yellow Sea region," *Biogeochem.*, **57**(58), 387~403(2002).
- Parfitt, R. L., Schipper, L. A., Baisden, W. T. and Elliott, A. H., "Nitrogen inputs and outputs for New Zealand in 2001 at national and regional scales," *Biogeochem.*, **80**, 71~88(2006).
- Ortiz-zayas, J. R., Cuevas E., Mayol-Bracero, O. L., Donoso, L., Trebs, I., Figueroa-Nieves., D. and Mcdowell, W. H., "Urban influences on the nitrogen cycle in Puerto Rico," *Biogeochem.*, **79**, 109~133(2006).
- 최의소, 김태훈, "질소수지 분석을 통한 질소 배출량의 추정," 환경정책연구, **3**(1), 95~117(2004).
- 강필규, 이상원, 박혜경, 변명섭, 공동수, "충주호 퇴적물에서의 인과 질소 용출에 관한 연구," 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동총계학술발표회 논문집, pp. 1231~1241(2006).
- 김진수, 오광영, "농촌지역에서의 유기물 호흡의 평가," 한국농공학회지, **42**(5), 114~124(2000).
- 김창길, 김창용, "지역단위 농업환경모형의 체계화에 관한 연구," 한국농촌경제연구원, 연구보고 R441(2002).
- 이연, "한국농경지의 양분수지와 문제점," 농업과학기술원, 양분수지를 이용한 친환경농업 실천방안 심포지엄 자료집, pp. 35~59(2003).
- Zessner, M. and Lampert, C., "The use of regional balances in water quality management," *Urban Water*, **4**, 73~83(2002).
- Krug, E. C. and Winstanley, D., "The need for comprehensive and consistent treatment of the nitrogen cycle in nitrogen cycling and mass balance studies," *The Sci. Total Environ.*, **293**, 1~9(2002).
- Pacini, C., Wossink, A., Giesen, G., Vazzana, C. and Huirne, R., "Evaluation of sustainability of organic, integrated and conventional farming systems: a farm and field-scale analysis," *Agric., Ecosystems Environ.*, **95**, 273~288(2003).
- 환경부, "2010 환경통계연감," 환경부(2011).
- 국토해양부, "2011 지적통계연보," 국토해양부(2011).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Climate Change 2001: The scientific basis, Cambridge University PRESS, Cambridge, UK.(2001).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference manual," IPCC,(1996).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Greenhouse gas emissions from agricultural soils. In: Greenhouse gas inventory reference manual; Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories," Vol. 3, Section 4.5 Agriculture (eds Houghton JT et al.), IPCC/OECD/IEA. UK Meteorological Office, Bracknell, UK(1997).
- 이영희, "한반도에서의 질소침착량의 추정," 박사학위 논문, 서울대(2002).
- Takeda, I., Kunimatsu, T., Kobayashi S. and Maruyama, T., "Pollutants balance of a paddy field area and its loadings in the water system- Studies on pollution loadings from a paddy field area(II)," *Jap. Soc. Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, **153**, 63~72(1991).
- Yuyama Y., Nakamura, M., Hata, K. and Hirayama, M., "Material balance in model paddy fields with irrigation from eutrophied lake," 第3回日韓共同研究セミナー, 12~25(2003).
- Bashkin, V. N., Park, S. U., Choi, M. S. and Lee, C. B., "Nitrogen budgets for the Republic of Korea and the Yellow Sea region," *Biogeochem.*, **57**(58), 387~403(2002).
- 물환경정보시스템 포털사이트, <http://water.nier.go.kr/index.jsp/>(2011).
- 농촌진흥청, "농업환경변동조사사업," 국립농업과학원, pp. 120~146(2008).
- 김현수, 김진수, 김영일, 정병호, "논의 영양물질 배출부하 특성과 수질정화 기능 분석," 한국관개배수학회지, **11**(1), 34~44(2004).
- 김창길, 김태영, 신용광, 강창용, 허장, 노기안, 최지용, 한대호, "친환경농업체제로의 전환을 위한 전략과 추진방안," 한국농촌경제연구원(2004).
- 최진규, 한강완, 구자용, 손재권, "관개용 저수지 및 양수장의 농업용수 공급량 및 수질," 한국도양비료학회지, **34**(3), 205~212(2004).
- 노기안, 김민경, 고병구, 김건업, 심교문, 이덕배, "질소수지에 의한 환경특성과 영농방법별 비농사의 수질영향 평가," 한국도양비료학회지, **42**(6), 439~446(2009).
- 해양경찰청, "2011 해양경찰백서," 해양경찰청(2011).
- e-나라리포 포털사이트, <http://www.index.go.kr/egams/index>.

- jsp/(2011).
39. 농림수산부 환경부 합동, “가축분뇨 관리·이용종합대책,” 농림수산부 환경부 합동(2011).
 40. 한국사료협회 포털사이트, <http://www.kofeed.org/>(2011).
 41. 김건엽, 소규호, 정현철, 심교문, 이슬비, 이덕배, “고추와 콩 재배에서 토양온도, 토양수분과 무기태질소 변화에 따른 아산화질소 배출 평가,” 한국토양비료학회지, **43**(6), 880~885(2010).
 42. 농촌진흥청, “온실가스 저감을 위한 발작물 재배 기술,” 국립농업과학원(2011).
 43. Cao, B., He, F. Y., Xu, Q. M., Yin, B. and Cal, G. X., “Denitrification losses and N₂O emissions from nitrogen fertilizer applied to a vegetable field,” *Pedosphere*, **16**(3), 390~397(2006).
 44. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Intergovernmental Panel on Climate Change for national greenhouse gas inventories,” OECD, Paris, Chap. 4 Agriculture: nitrous oxide from agricultural soils and manure management(1997).
 45. Cole, V., “Agriculture options for mitigation of greenhouse gas emissions,” In: Climate change 1995-Impacts, Adaptations and Mitigations of Climate Change: Scientific-Technical analyses: The Second Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate change, R. T. Watson, M. C. Zinyowera and R. M. Moss (eds.), Cambridge University Press, New York, U.S.A(1995).
 46. Mosier, A. R., Duxbury, J. M., Freney, J. R., Heinemeyer, O. and Minami, K., “Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation,” *Plant and Soil*(1995a).
 47. Mosier, A. R., Duxbury, J. M., Freney, J. R., Heinemeyer, O. and Minami, K., “Mitigation agricultural emissions of nitrous oxide,” Submitted Climatic change(1995b).
 48. Kallenbach, C. M., Rolston, D. E. and Horwath, W., “Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depending on type of irrigation,” *Agric., Ecosystems Environ.*, **132**, 251~260(2010).
 49. Ko, J. Y. and Kang, H. W., “The effects of cultural practices on methane emission from rice paddy field,” *Nutr. Cycling Agroecosystems*, **58**, 311~314(2000).
 50. 이연, 박양호, 김석철, “작물재배시 대기중으로의 질소손실에 관한 연구,” 농업과학기술원, 477~498(2004).
 51. 농림수산식품부포털사이트, <http://www.rnifaff.go.kr/>(2011).
 52. Cai, G. X., Chen, D. L., Ding, H., Pacholski, A., Fan, X. H. and Zhu, Z. L., “Nitrogen loss from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain,” *Nutr. Cycling Agroecosystems*, **63**, 187~195(2002).
 53. 김민경, 노기안, 박성진, 최철만, 고병구, 윤순강, 이종식, “충남 고성천 유역의 하천 수질 평가를 이용한 유역단위 질소와 인수지 분석,” 한국환경농학회지, **28**(1), 32~37(2009).
 54. 통계청포털사이트, <http://www.kpstat.go.kr/>(2010).
 55. 국토해양부포털사이트, <http://www.mltm.go.kr/>(2010).
 56. 한국농어촌공사, “2010 농업생산기반정비사업통계연보,” 한국농어촌공사(2010).
 57. 고지연, 이재생, 정기열, 최영대, 이동욱, 윤을수, 김춘식, 박성태, “배수 개선처리에 따른 토양 투수속도 변화가 논에서 CH₄ 및 N₂O 배출에 미치는 영향,” 한국토양비료학회지, **40**(3), 214~220(2007).
 58. Bouwman, A. F., “Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils,” *Nutr. Cycling Agroecosystems*, **46**, 53~70(1996).
 59. Harrison, E. Z., Telega, L., McBride, M., Bossard, S., Chase, L., Bouldin, D. and Czymmek, K., “Considerations for dairy farms regarding use of sewage sludges sludge products and septage,” Cornell Waste Management Institute(2003).
 60. 김창길, 김태영, “지역단위 농업생태계의 물질균형 분석,” 한국농업경제학회지, **45**(4), 191~222(2004).