

2008년도 대한민국 질소수지 연구: 비점오염증가 및 N₂O 발생량산정

Nitrogen Budget of South Korea in 2008: Evaluation of Non-point Source Pollution and N₂O Emission

남역현 · 안상우 · 박재우[†]
Yock-Hyoun Nam · Sang-Woo An · Jae-Woo Park[†]

한양대학교 건설환경공학과
Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

(2010년 3월 19일 접수, 2011년 2월 28일 채택)

Abstract : The main objective of this research was to estimate Nitrogen budget of South Korea in 2008. Input-output budgets for nitrogen fluxes were categorized into three sections: cities, agricultural area, and forest. Chemical and biological fixation, dry and wet deposition, imported food and feed were used as the nitrogen input. Crop uptake, volatilization, denitrification, leaching, runoff, and forest consumption were used as the nitrogen outputs. Annual total nitrogen input was 1,294,155 ton/yr, and output was 632,228 ton/yr. Comparison with a previous research in 2005 indicates that nitrogen input was decreased by 1.9% due to the decrease in nitrogen fertilizer while nitrogen output was decreased by 6.3%. Non-point source (NPS) pollution was also estimated by mass balance approach, which increased by 22% than the previous research in 2005. The emission of nitrous oxide (N₂O) caused by denitrification was newly examined in this research. About 8,289 ton/yr of N₂O was released from agriculture area and domestic wastewater treatment plant.

Key Words : Nitrogen, Nitrogen Budget, Nonpoint Source Pollution, Nitrous Oxide

요약 : 본 연구에서는 기존의 질소 수지에 관한 연구를 바탕으로, 우리나라의 2008년 질소의 총 유입과 유출을 수지분석 방법을 이용하여 추정하였다. 질소의 유·출입은 도시지역, 농·축산지역, 임야지역의 세부분으로 나누어 산출하였다. 질소의 주요 유입으로는 화학적, 생물학적 질소고정, 건식 및 습식 침착량, 해외로부터 수입된 양 등이 있으며, 유출된 양은 작물흡수, 휘발, 탈질, 침식, 표면유출, 산림소비 등으로 결정하고 그 양을 추정하였다. 연간 질소의 총 유입량은 1,294,155 ton/yr이며, 총 유출량은 632,228 ton/yr이었다. 질소수지를 기존의 2005년 질소 수지와 상호 비교 및 분석한 결과, 2008년도에 총 유입된 질소는 2005년 질소유입 보다 1.9% 저감된 것으로 조사되었다. 총 유입 질소의 감소는 질소비료 사용량 감소, 국토 개발, 경작지 감소 등으로 인한 결과이며 총 유출 질소는 6.3% 감소하였다. 질소 수지 분석에 의한 연간 발생한 비점오염의 양을 추정해본 결과, 2005년도에 연구되었던 질소 수지량에 비해서 22% 증가한 것으로 조사되었다. 탈질로부터 아산화질소 배출량을 산정하였는데, 농업지역과 하수처리장에서 약 8,289 ton/yr이 배출되었다.

주제어 : 질소, 질소수지, 비점오염, 아산화질소

1. 서론

대기 성분 중 약 80%를 차지하고 있는 질소는 자연생태계인 대기, 물, 토양, 생물 영역에서 질소기체(N₂), 암모늄이온(NH₄⁺), 암모니아(NH₃), 질산성 질소(NO₃⁻), 아질산성 질소(NO₂⁻) 등의 형태로 순환하고 있다.¹⁾ 미생물에 의한 일련의 변환을 통해 질소는 식물에 유용한 형태인 단백질과 핵산의 성분으로 변하고, 궁극적으로 식물은 모든 동물의 생명을 유지시키는 먹이로 사용되게 된다. 이러한 질소순환의 과정은 질소고정(Nitrogen fixation), 질소동화(Nitrogen assimilation), 암모니아화반응(Ammonification), 질산화반응(Nitrification), 탈질산화 반응(Denitrification)으로 알려져 있다.

수중에 존재하는 질소는 수생 식물과 미생물의 생육을 촉진시켜 부영양화와 같은 수질오염을 일으키는 주요원인으로 작용하게 된다.²⁾ 또한, 질소순환과정에서 생성되는 아산화질소(N₂O)는 이산화탄소(CO₂)의 온난화지수의 310배에

해당하는 것으로 알려져 있다. 하지만 질소는 농작물 증산에 매우 효과적이어서 질소 성분의 인공비료의 사용이 크게 증가하였으며, 자동차 배기가스에서 생성된 NO_x와 같은 질소산화물의 배출은 크게 증가하여 생태계 내 질소순환이 1980년도에 비해 크게 변화하고 있는 실정이다.³⁾ 우리나라의 경우, 경지면적은 OECD 기준 21위에 불과하지만 질소비료의 소비량은 13위로 매우 높은 수준으로 보고되고 있으며,⁴⁾ N₂O 배출량은 '90년 대비 약 7% 정도 배출량이 증가한 것으로 조사되었다.⁵⁾ 이러한 질소의 문제를 해결하기 위하여 주로 하천에 유입되는 비점오염과 관련한 다양한 연구들이 추진되고 있으며,^{6,7)} 현재 환경부에서는 기존의 여러 조사연구 결과를 종합하여 토지이용에 따른 오염물질 배출부하량을 원단위법을 이용하여 산정하고는 있지만 물질수지분석방법을 통한 질소순환의 이해와 추정에 관한 연구는 극히 미미한 실정이다.

질소 배출량을 결정하는 방법으로는 직접 하천 등으로부

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

터 바다로 유출되는 유량과 농도를 실측하여 산출하는 방법과 환경부의 원단위법을 이용하여 배출부하량을 산정하는 방법이 있으나,⁸⁾ 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 질소의 순환을 이해하는데 많이 사용되고 있으며,⁹⁻¹⁴⁾ 하천, 분수계,¹²⁾ 호수¹⁵⁾ 등 분석하고자 하는 공간적 영역의 설정에 따라 다양한 질소 수지분석이 이뤄지고 있다. 이러한 질소 수지분석방법은 우리나라 전체에 유입되는 모든 질소량을 매년 발간되는 각종 통계자료와 문헌자료 등을 이용하여 추정하고 국내 현실을 고려하여 유출되는 질소의 양을 추정하는 방법으로서 전체 질소의 양을 파악할 수 있는 효율적인 방법이다.

우리나라에서 국가적인 규모에서의 질소 수지에 관한 연구는 이전에 수차례 진행되었다. 1994년부터 1997년 사이의 우리나라와 남한과 황해의 질소수지 연구⁹⁾와, 2001년도 질소수지 분석을 통한 질소배출량의 추정,⁸⁾ 2005년 우리나라 전체 질소수지 연구¹⁶⁾가 진행되었다. 지역규모의 질소 흐름에 관한 연구로는 충추호,¹⁵⁾ 충남 고성천 유역,¹⁷⁾ 그리고 질소의 유출입양이 많은 논영양물질 배출 부하특성을 파악한 연구¹⁸⁾ 등이 발표되었다. 국가규모의 질소 수지연구는 모두 IPCC guideline을 토대로 질소수지를 산정하였으나 당시 국내 연구 자료의 부족과 더불어 2008년 유기성 오니의 매립 및 해양투기 금지 등과 같은 정부의 새로운 정책과 방침으로 인하여 질소의 유출 흐름이 달라져서 한국의 질소 수지를 새로이 파악할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 2010년에 찾을 수 있는 가장 최근의 2008년도 통계 및 문헌자료를 바탕으로 기존의 2005년 질소수지 결과를 보완하고 수정하는 것과 더불어, 기존의 연구와 상호 비교 및 분석함으로써 우리나라의 질소 수지 경향을 파악하는 것을 목표로 하였다. 특히, 기존 질소 수지에서 포함되지 않았던 폐수처리장과 분뇨처리장에서 발생하는 아산화질소(Nitrous oxide; N₂O)의 양을 질소 수지에 포함하여 질소 순환과정에서 발생하는 온난화 영향을 정량화하였다.

2. 연구방법

국가적인 규모의 질소 수지에 관한 이전 연구결과와 더불어 환경부, 농림수산부, 국토해양부 등의 산하기관에서 발간한 2008년 통계자료¹⁹⁻²¹⁾을 이용하였다. 남한 지역 전체의 질소 유입과 유출의 양을 측정하기 위해서 배출특성이 다른 세 가지 환경인 도시지역, 농업 및 축산업지역, 임야지역으로 구분하여 질소 수지를 분석하였다.¹⁶⁾ 질소 수지를 정량화하고 보편적으로 활용하기 위해서 일반적인 평균값 및 중간값을 주로 사용하였으며, 총 질소 수지량의 기본 단

위는 기존연구에서 많이 사용하는 kg/ha/yr와 총량은 ton/yr로 나타내었다.

2.1. 질소 유입 산출

우리나라 전체의 질소 유입 및 유출량을 산출하기 위해서 사람이 생활할 수 있는 모든 공간은 도시지역으로 선정하였으며, 농업지역은 경작이 이뤄지는 논과 밭으로 세분화하였다. 그리고 축산지역은 축산업종을 대상으로 산출하였으며, 국토면적의 60% 이상 차지하는 삼림지역을 임야지역으로 구분하였다. 도시지역의 토양은 불투수성 포장이 되어 있어 질소가 침착되거나 고정되기 힘들고, 인구가 밀집되어 있으므로 식료품을 통한 질소 유입(Food)을 고려하였다. 농업 및 축산업 지역은 건식 및 습식을 포함한 대기로부터의 질소 침착량(Deposition), 질소고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량(Fixation), 수입 또는 국내에서 생산된 비료에 의한 토양 내 유입량(Fertilizer), 미처리된 가축분뇨에 의한 유입 및 퇴비로의 재사용량(Compost), 관개용수에 의한 토양으로 질소 유입(Irrigation)을 고려하였다. 임야지역은 특별한 질소 유입원이 없으므로 침착 및 고정량을 대상으로 질소유입을 산정하였다.

2.2. 질소 유출 산출

질소의 유출은 농업지역에서는 작물에 의한 흡수량, 토양에서의 탈질량, 그리고 토양으로 축적된 양으로 질소 유출량을 추정하였다. 축산업에서는 가축 분뇨의 발생량 중 휘발되거나 탈질되는 양, 그리고 퇴비로 재사용된 양을 고려하여 질소 유출량으로 추정하였다. 임야지역에서는 탈질량과 임야의 흡수량을 질소 유출량으로 하였다. 도시지역에서는 인체에서 사용된 질소 이외에 하수처리장에서 처리되어 배출된 양과 음식물 쓰레기의 형태로 배출되는 질소량을 고려하였으며 하수처리장에서의 휘발 및 탈질되는 양을 유출량으로 추정하였다.

2.3. 비점오염량 산출

점원오염원의 처리시설은 상당 부분 정비되면서 비점오염에 의한 강 또는 호소의 수질에 미치는 영향이 증가하였다. 비점오염은 도시지역의 축적된 오염물질 증가와 농업지역의 필요이상의 시비량과 관개용수의 사용, 축산분뇨의 무단 방출이 비점오염의 주원인으로 알려져 있으며, 예측 불가능한 자연조건에 의해 발생하여 정량적 분석에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 현재 우리나라에서 소규모 지역에서의 비점오염에 대한 연구^{22,23)}는 시행되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서 비점오염원의 산출은 지목별 질소 유입 및 유출 수지를 이용하여 유출이 확인되지 않는 모든 질소량을 비점오염량으로 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 1. Comparing of government research

Item	2005		2008	
	Korea National Statistical Office	Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs	Korea National Statistical Office	Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs
Population	48,138,000	-	48,607,000	-
Rice paddy (ha)	1,104,800	1215,200	1,046,000	1,194,500
Farm (ha)	719,200	795,600	713,000	785,200
Forest (ha)	6,393,900	6,480,500	6,374,875	6,454,600
Territory (ha)	-	9,964,616	-	9,982,778

3.1. 주요 통계 자료 및 문헌자료

2008년의 우리나라의 질소수지를 위한 주요 통계자료는 통계청²⁴⁾ 및 기타 정부기관의 공시 자료를 통하여 취합하였다. 현재 국토면적을 공시하고 있는 정부기관은 통계청과 국토해양부²⁵⁾로써 각 정부기관의 자료를 취합하였으며 논, 밭, 그리고 임야의 면적은 두 기관의 공시자료가 서로 상이한 것으로 조사되었다. 국토해양부의 지적통계연보는 각 지방행정기관에 비치 보관되어 있는 지적공부에 등록된 토지의 면적과 지번수를 집계한 자료이며, 통계청은 경지면적 조사 및 한국농어촌공사의 농업생산기반정비사업통계연보²⁶⁾에서 취합한 자료를 제공하고 있다. 이러한 행정 부처간의 자료 취합의 상이점 때문에 지목별 면적은 서로 상이할 수 밖에 없으며, 정확한 질소수지를 위해서는 이를 통일화할 수 있는 방법이 선행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 보다 정확한 질소수지를 위하여 실제 경작지의 면적을 조사한 것으로 판단되는 통계청의 자료를 사용하였다.

우리나라의 2008년 국토면적은 9,982,778 ha이며, 2005년에 비하여 간척사업 등으로 인하여 약 18,000 ha가 증가한 것으로 조사되었다. 2008년 지목별 이용현황 중, 논과 밭의 농경지는 1,046,000 ha와 713,000 ha로 전체 국토면적의 17.6%로 조사되었으며, 임야는 6,374,875 ha로 63.8%의 가장 큰

비율을 차지하는 것으로 나타났다(Table 1). 우리나라의 총 인구수는 5년마다 인구총조사를 실시하여 정확한 자료는 2005년도 밖에 없으나 통계청의 연령별 추계인구자료를 통하여 연도별 인구수를 추정하여 보면, 2008년의 인구수는 48,607천명이며 2005년의 48,138천명에 비하여 약 469천명이 증가한 것으로 나타났다. 이러한 통계자료를 통하여 경지면적은 도로건설, 도시 확장 등의 도시화에 따른 경지면적의 감소 추세는 지속될 것으로 전망되며, 인구수는 2000년 이후로 고령화 및 저출산으로 인하여 인구성장률이 둔화되고 있는 것으로 조사되었다.

농축산업의 화학비료량, 가축두수 및 사료량, 해양투기량 등 질소수지에 필요한 모든 자료는 관련 행정부처인 통계청, 농림수산식품부, 해양경찰청 등의 자료를 통하여 취합하여 2008년 질소수지 연구에 사용하였다. 그 외 침착율, 휘산율, 탈질율 등의 자료는 문헌에 보고된 자료를 취합하여 평균값 및 중간값을 사용하였다. 본 연구에 이용된 질소수지 인자값들은 Table 2와 같다.

3.2. 질소 유입

농축산활동에 의하여 유입되는 질소는 비료와 사료 공급량, 생물학적 질소 고정량, 그리고 대기 중으로부터 강우나

Table 2. Input of nitrogen considered for nitrogen application rate

Item	Application rate	Reference
Paddy field fixation	35 kg/ha/yr	Yun (2008)
Upland fixation	15 kg/ha/yr	Bashkin et al (2002)
Forest fixation	6.7 kg/ha/yr	Bashkin et al (2002)
Agricultural deposition	11 kg/ha/yr	Park (2001), Lee (2000)
Forest deposition	17 kg/ha/yr	Shim and Park (2001)
Irrigation flow rate	24 kg/ha/yr	Yun (2008)
Denitrification of Paddy field	30~70 kg/ha/yr	Kim et al (2004)
Denitrification of Upland	30 kg/ha/yr	Kim et al (2004)
Denitrification of Forest	5 kg/ha/yr	Yun (2008)
Forest absorption	4.9 kg/ha/yr	Song et al (2004)
Protein in feed	15%	Yun (2008)
Nitrogen in protein	16%	Yun (2008)
Livestock manure of waste	27.6%	Yun (2008)
Uptake	61.7%	Kim et al (2004)
Volatilization of agricultural	16.5%	Kim et al (2004)
Leaching	2.45%	Korea Coast Guard (2008) white paper

Table 3. Nitrogen input from atmospheric deposition and biological fixation

Item		Area (ha)	Application rate (kg/ha/yr)	Total input (ton/yr)	Reference
Atmospheric deposition	Paddy field	1,046,000	11	11,506	Park (2001)
	Upland	713,000	11	7,843	Lee (2000)
	Forest	6,374,875	17	108,372	Shim and Park (2001)
Biological fixation	Paddy field	1,046,000	35	36,610	Yun (2008)
	Upland	713,000	15	10,695	Bashkin et al. (2002)
	Forest	6,374,875	6.7	42,711	Shim and Park (2001)

분진의 형태로 침착되는 양으로 결정하였으며, 모든 단계에서 질소 추정치는 Table 3에 의하여 추정하였다.

최근 10년 동안 우리나라는 급격한 도시화 및 쌀 소비량 감소에 따른 경지면적의 감소와 유기농 농법의 보급 확대에 의한 가축분뇨 퇴비 등의 무기화학비료 사용량은 점차 감소하고 있는 추세인 것으로 나타났다(Fig. 1).²⁰⁾ 2005년도 국내에서 비료로 판매된 무기질소량은 총 376,000 ton/yr에서 2008년 311,000 ton/yr로 약 65,000 ton/yr의 무기질소량이 감소한 것으로 조사되었다.

농경지 내, 질소고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량은 여러 문헌^{14,27,28)}들을 조사하여 논과 밭에서의 질소 고정량인 35 kg/ha/yr¹⁶⁾와 15 kg/ha/yr⁹⁾를 이용하여 산출된 논과 밭에서 생물학적 총 질소 고정량은 연간 36,610 ton/yr, 10,695 ton/yr이다. 대기 중으로부터 농경지에 침착되는 양인 11 kg/ha/yr²⁹⁾을 통하여 논과 밭에서 침착되는 양을 추정 한 결과 11,506 ton/yr와 7,843 ton/yr로 도출되었다(Table 3). 또한, 전체 침착량 중 건조침착상태가 30%이고 강우에 의해 침착되는 양이 70%라 추정하면²⁹⁾ 임야 지역의 침착 고정량을 고려하였을 때 383,16 ton/yr이 건조상태로 침착되었으며 89,404 ton/yr이 습식상태로 침착되었다. 관개용수에 의한 질소유입량은 농업용수의 평균 질소농도인 2.8 mg/L을 감안하여 산출한 결과, 24.25 kg/ha/yr로 조사되었다. 이는 기존 문헌에서 조사된 15.2~39.9kg/ha/yr^{18,30,31)}에 적합한 나타났으며 관개용수에 의한 연간 총 질소유입량은 42,656 ton/yr으로 추정하였다.

축산업에서 질소유입은 가축사료를 통한 유입을 대상으로 산출되었다. 축산업의 사료 소비량은 가축두수의 증가로 인하여 매년 증가하고 있는 추세인 것으로 조사되었다. 2005년도 국내에서 소비된 사료량은 총 15,780,000 ton/yr에서 2008년 16,130,000 ton/yr로 약 350,000 ton/yr의 사료가 증가한 것으로 조사되었다.¹⁹⁾ 일반적으로 사료 내 단백질 함량과 단백질 내 질소의 함량인 15%와 16%를 이용하여 축산업으로 유입된 질소의 양을 추정하면 387,120 ton/yr으로 조사되었다.

임야지역에서의 질소유입은 특별한 질소 유입원이 없으므로 질소고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량 및 대기 중으로부터 강우나 분진의 형태로 침착되는 양으로 결정하였다. 질소고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량과 대기 중 침착되는 양은 6.7 kg/ha/yr⁹⁾와 17 kg/ha/yr²²⁾으로, 임야에서 고정된 질소량과 침착되는 양은 42,712 ton/yr과 108,372 ton/yr로 추정되었다.

도시지역에서 질소유입은 대표적으로 식료품에 의한 질소 유입(Food)이 증가 된다. 식료품에 의하여 섭취할 수 있는 단백질은 동물성 단백질과 식물성 단백질로 구분되며, 2008년 1인당 단백질 섭취량은 75.8g/day³³⁾으로 조사되었다. 이 중에서 동물성 단백질 섭취량은 35.9 g/day이었으며, 식물성 단백질 섭취량은 39.9 g/day이다. 2008년 식량 자급율이 28%이므로, 총 질소 섭취 유입원 중 식량자급률 이외의 부분인 수입품에 의한 질소 유입은 154,922 ton/yr으로 조사되었다. 따라서 2008년 한해 질소의 총 유입은 1,294,328 ton/

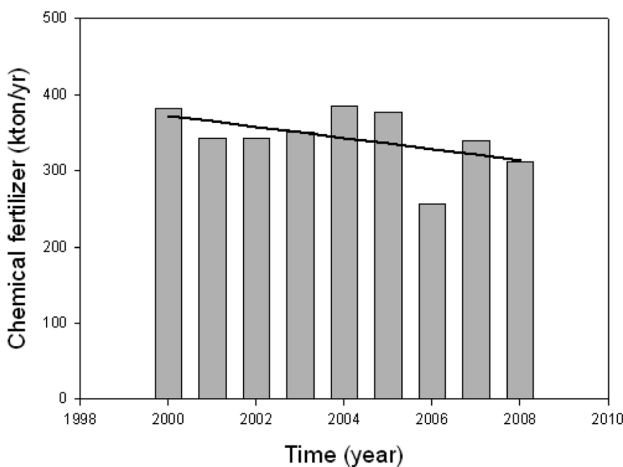


Fig. 1. Annual use of chemical fertilizer in South Korea.

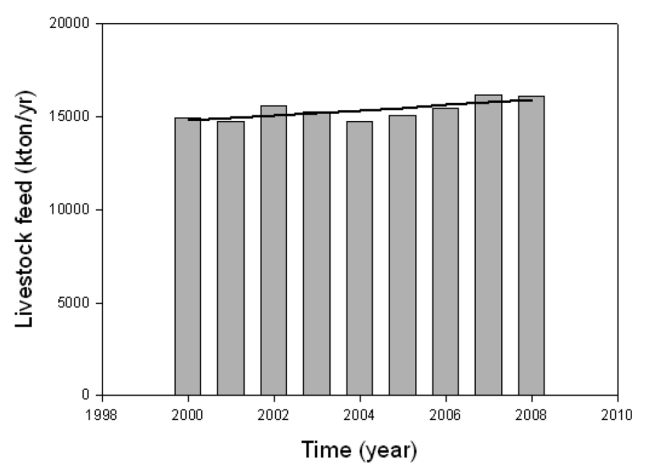


Fig. 2. Annual change in livestock feed in South Korea.

yr으로 농업, 축산업, 임야지역, 그리고 도시지역에서 유입되는 질소량은 각각 600,254 ton/yr, 387,120 ton/yr, 151,085 ton/yr, 그리고 154,922 ton/yr로 조사되었다.

3.3. 질소 유출

농축산활동에 의하여 유출되는 질소의 유출량은 비료 주입에 의해 생산된 작물에 함유되는 양과 가축사료에 의하여 가축분뇨의 형태로 배출되는 양과 축산물로 생산되어 생활계로 유출되는 양, 비료와 가축분뇨로부터 대기 중에 암모니아 질소로 휘발되거나 탈질되는 양, 그리고 나머지는 잔류되거나 축적되어 비점오염으로 유출되는 양을 추정하였다.

농업지역에서 질소의 유출은 작물에 의한 영양물질 흡수량을 제외한 농업지역에 부과된 질소의 양을 유출량으로 하였다. 표준시비량보다 많은 질소비료를 사용할 경우, 작물로 흡수되는 질소의 양은 일정하여 과잉의 질소가 수계로 유출된다. 질소의 작물 흡수는 강우량, 비료량, 기후 등에 많은 영향을 받으므로 본 연구에서는 연간 생산된 농산물의 수확량과 경작지의 질소 흡수량을 이용하여 평균 질소 흡수량을 산정하였다(Table 4). 2008년 영양물질 흡수량은 총 106,102 ton/yr으로 2005년에 비하여 경작지 감소로 인한 작물생산량이 감소한 것으로 나타났다. 또한, 경작지로의 유입질소의 61.7%가 흡수되므로¹⁸⁾ 작물흡수로 유출된 질소량은 370,356 ton/yr으로 조사되었다. 따라서 농경지에서 질소 유출량은 평균값인 238,229 ton/yr로 산출되었다.

농업지역에서의 질소의 탈질에 관한 연구는 여러 연구가 진행되었으나, 본 연구에서는 기존 탈질의 관한 연구 중 우리나라 실정에 가장 적합한 값을 사용하여 추정하고자 하였다. 본 연구는 농업지역에서 탈질되는 질소량을 산출하기 위하여 논과 밭에서 탈질되는 양과 더불어 비료 사용량에서 탈질되는 양을 각각 산출하여 평균값을 사용하였다. 농업지역에서의 탈질량은 논에 경우에 30~70 kg/ha/yr와 밭의 30 kg/ha/yr로 알려져 있다.³⁴⁾ 또한 비료사용량 대비 탈질량은 논과 밭에서 각각 32%와 15%로 보고되었다.⁹⁾ 두 가지 방법으로 탈질되는 양을 산정하여 보면 73,690~123,272 ton/yr으로 산출되며, 본 연구에서는 평균값인 98,481 ton/yr가 농업지역에서 탈질되는 것으로 추정하였다. 농업지역에

서의 비료에 의한 휘발량은 시비량의 16.5%가 휘발되므로 51,315 ton/yr이다. 농업지역에서 토양표면으로 유입된 질소가 토양을 통해 지하수로 유출되는 양은 유입된 총 질소의 1.6~3.3% 정도로 평균값인 2.45%을 이용하면 총 14,706 ton/yr이 지하로 유출되는 것으로 나타났다.

축산업에서의 질소유출은 가축분뇨에 의한 유출로써 2008년 가축분뇨 발생량은 41,740,000 ton/yr³⁵⁾으로 조사되었다. 현재 일정규모의 가축을 사육하는 축산농가는 축산폐수 처리시설이 의무화 되어서, 축산농가의 97.6%가 축산분뇨처리시설을 갖추었으며, 정상적으로 가동하는 처리시설은 97.5%로 보고되었다. 퇴비, 액비, 퇴·액비로의 자원화 처리가 각각 79.6%, 3.5%, 그리고 8.5%로 조사되었으며, 축산분뇨의 정화처리는 8%를 차지하였다.³⁶⁾ 당해 해양투기 된 축산분뇨는 1,460,000 ton/yr³⁵⁾이었다. 가축분뇨 중 질소 발생량은 2005년 가축분뇨 양분발생량³⁷⁾과 가축 증가율¹⁹⁾을 고려하여 산출한 결과, 생분뇨는 299,906 ton/yr이며 자원화 과정에서 질소양분의 약 40%인 119,963 ton/yr가 휘산되는 것으로 추정되었다. 또한, 퇴·액비화된 가축분뇨는 179,985 ton/yr으로 조사되었다.

임야지역에서 질소의 유출량은 임야 흡수량 및 탈질양을 고려하여 산출하였다. 임야지역에서 탈질은 연구마다 크게 차이가 나는 경향이 있으며 유입질소량의 15~20%⁹⁾ 혹은 0.9~10 kg/ha/yr^{38,39)}가 탈질되는 것으로 알려져 있다. 임야지역에서의 탈질량은 26,606~31,874 ton/yr로 평균값을 적용하여 탈질량은 29,157 ton/yr으로 산정되었으며, 총 기체상태로 탈질되는 총량은 127,638 ton/yr로 산출하였다. 임야에서의 침엽수와 활엽수 및 혼합림의 줄기와 가지의 생장에 의한 단위 면적당 평균 질소 흡수량은 4.9 kg/ha/yr⁴⁰⁾이며, 수확량은 0.3 kg/ha/yr⁴⁰⁾으로 연간 임야지역에서 질소의 흡수량은 33,237 ton/yr으로 조사되었다.

도시지역에서의 질소의 유출량은 슬러지, 폐수처리량을 고려하였다. 1997년에 개정된 폐기물관리법에서 2005년 1월 1일부터 특별시, 광역시, 시 지역에서 발생하는 음식물류 폐기물의 직매립 금지와 더불어 2008년 유기성 오니의 해양투기가 금지되었다. 해양경찰청에서 조사된 해양 투기된 폐기물의 양이 2005년 이후 매년 감소하고 있으며,³⁵⁾ 해양 투기된 질소는 주로 하수슬러지 및 가축분뇨로 구분되며 해양투기 된 가축분뇨양은 1,460,000 ton/yr³⁵⁾이며, 질소의 휘발된 양 없이 모두 해양투기 되었다고 하였을 때 유출된 질소는 10,490 ton/yr으로 산출될 수 있다. 하수처리장에서 배출된 질소를 산정하기 위해 하수처리장 유입되는 질소량으로부터 배출량을 산정하였다. 우리나라의 하수처리시설의 하수도 보급률은 86.5%이므로 120,116 ton/yr의 질소가 하수처리장에 유입되며 13.5%인 20,140 ton/yr의 질소가 수계로 직접 유출된다. 하수슬러지 해양 투기량은 연간 2,471,000 ton/yr³⁵⁾이 발생하였다. 슬러지 건조 후 성분분석을 해보면 질소함량이 4.5%⁴¹⁾이다. 따라서 해양 배출된 하수슬러지의 질소의 양은 40,586 ton/yr이었으며, 해양 배출된 총 도시지역의 질소량은 51,076 ton/yr로 추정되었다.

Table 4. Estimated nitrogen in agricultural production of South Korea

	Annual production		g protein/kg		Nitrogen (ton)	
	2005	2008	2005	2008	2005	2008
Rice	4,768,368	4,843,478	88	88	67,138.6	68,196.2
Barley	200,486	180,142	92	92	2,951.2	2,651.7
Vegetables	9,097,406	9,343,423	15	15	21,833.8	22,424.2
Fruit	2,592,950	2,697,734	6	6	2,489.2	2,589.8
Pulses	198,752	146,895	330	330	10,494.1	7,756.1
potatoes	266,425	222,999	22	22	937.8	785.0
Grain	86,366	103,754	106	106	1,464.8	1,759.7
Total	-	-	-	-	107,309.5	106,162.6

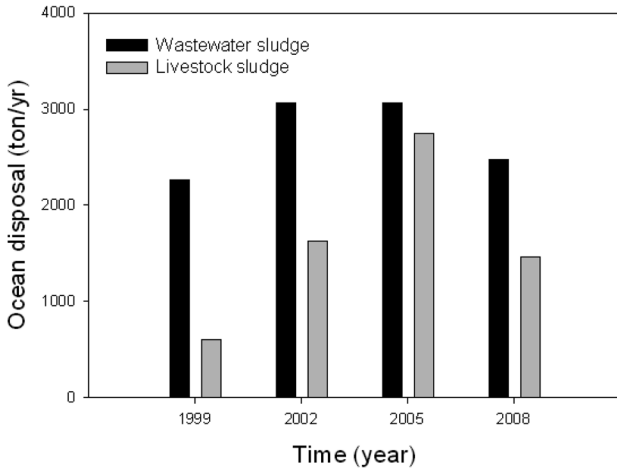


Fig. 3. Wastewater and livestock sludge disposed in ocean in South Korea.

3.4. 질소 수지 내 N₂O 발생량

지구온난화를 유발하는 미세기체 중 CO₂ 다음으로 중요한 온실가스인 N₂O는 농업활동에 의한 인위적 배출량이 70%에 달하는 것으로 알려져 있다. N₂O는 질소시비와 물관리가 결합된 특정조건에서는 상당한 양이 발생할 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다. 현재 사용되고 있는 국가인벤토리 산출은 IPCC의 방법론 2단계(Phase II methodology)에 의해 농업지역에서 발생하는 N₂O는 토양으로부터 부가된 전체 질소의 1.25%를 IPCC 배출계수인 기본 값으로 정하고 있다.^{42,44,45} 이런 기본 값은 N₂O 배출에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수들을 고려하지 않는 것이나, 국내 농경지에서 N₂O 배출에 관한 연구가 경작시기에 국한되어 있어 IPCC의 방법론에 의하여 추정하였다. 농업계에서 토양에 부가된 질소의 양을 비료와 퇴비로 한정하여 N₂O 방출량을 추정하면 질소의 총 유입은 490,943 ton/yr 중, N₂O로 배출되는 양은 6,137 ton/yr로 조사되었다. 탈질에 의한 유출량인 98,481 ton/yr의 약 6.2%가 N₂O에 해당하는 것으로 추정되었다.

하수처리장에서 배출되는 N₂O의 배출은 하수공정의 공정 인자와 온도 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며,⁴⁶ 일본에서 조사된 하수처리장의 N₂O 배출계수는 10 mg/m³이다.⁴⁷ 최근 우리나라에서는 하수처리공정별 N₂O 배출계수를 1.25~32.20 g/N·kg으로 산정하였으나,⁴⁷ 하수처리장에서 발생하는 총 N₂O양에 관한 조사는 현재까지 보고되지 않은 실정이다. 본 연구에서는 N₂O 배출량을 산정을 위하여 식 (1)에 이용하였으며, 식 (1)은 1인당 연간 단백질 섭취량에서 N₂O 배출계수인 0.01을 산정하여 추정하는 방식이다.⁴⁸ 하수처리장에서 발생하는 N₂O양은 2,152 ton/yr로 폐수처리장에서 제거되는 질소의 약 3.62%로 조사되었다.

$$N_2O(s) = Protein \times F_{NPR} \times NR_{people} \times EF_6 \quad (1)$$

여기서, N₂O(s) : N₂O 배출량 (kg/yr)
Protein : 연간 단백질 섭취량 (g/day)

F_{NPR} : 단백질 중 질소 비율 (%)
NR_{people} : 총 인구수
EF₆ : 배출계수 (N₂O kg/sewage-N kg)

질소수지를 통하여 농업지역과 하수처리장에서 발생하는 총 N₂O양은 8,289 ton/yr로 산출되었다. 농업지역과 하수처리장에서 N₂O 배출은 생물학적 과정의 산물이며 자연 생태계 내 물질순환의 한 과정이므로 완전한 저감방법의 개발은 실제적으로 불가능하다. 그러나 농업지역의 경우에 재배방법과 재배관리를 통하여 N₂O 배출을 최소화할 수 있는 연구^{38,39}와 하수처리장은 각 고도처리공법에서 N₂O 배출을 규명한 연구가 시도되고 있으며,⁴⁷ 연구결과를 통하여 N₂O 배출을 최소화할 수 있는 방안들의 도출과 더불어 국내외 여건 변화에 대처할 수 있는 N₂O 저감 방법의 도출이 필요하다.

3.5. 총 질소 균형 수지

2008년 남한 전체의 질소 유출입 수지 Fig. 4와 각 지역마다의 질소의 수지를 Fig. 5에 나타내었다.

농업지역의 질소의 총 유입량과 유출량은 600,254 ton/yr과 402,731 ton/yr으로 산정되었다. 축산업에서의 사료로 인한 가축들로의 질소유입은 387,120 ton/yr으로 이중 130,453 ton/yr이 휘발 또는 해양유출로 직접적인 수지 유출량이 되며 179,985 ton/yr은 퇴비로 재사용된 것으로 확인되었다. 임야지역에서는 대기로부터 질소 침착과 생물학적 고정으로 151,085 ton/yr의 질소가 유입됐으며, 유입 질소 중 탈질과 산림소비로 62,306 ton/yr이 유출되었다. 도시지역에서는 해외에서 수입하여 도시계로 유입된 질소를 포함한 전체 유입 질소는 154,922 ton/yr로 하수도로 수집되지 않은 13.5%은 비점오염으로 20,410 ton/yr의 질소가 유출되었다. 하수처리장에서 탈질된 질소와 슬러지 형태로 유출된 질소는

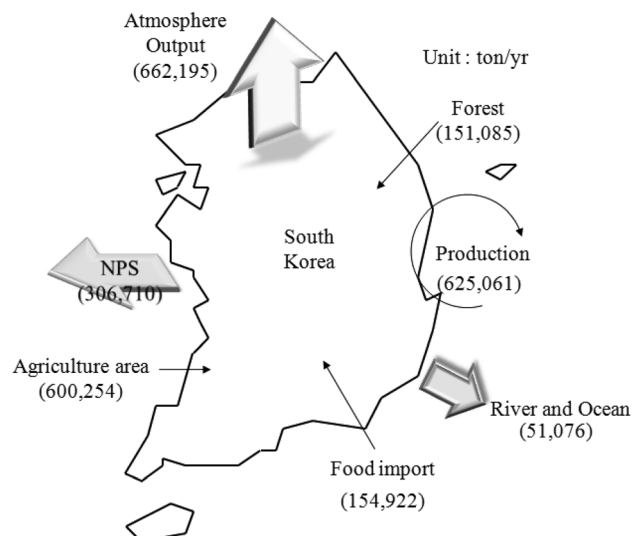


Fig. 4. Input and output budget of nitrogen of South Korea in 2008.

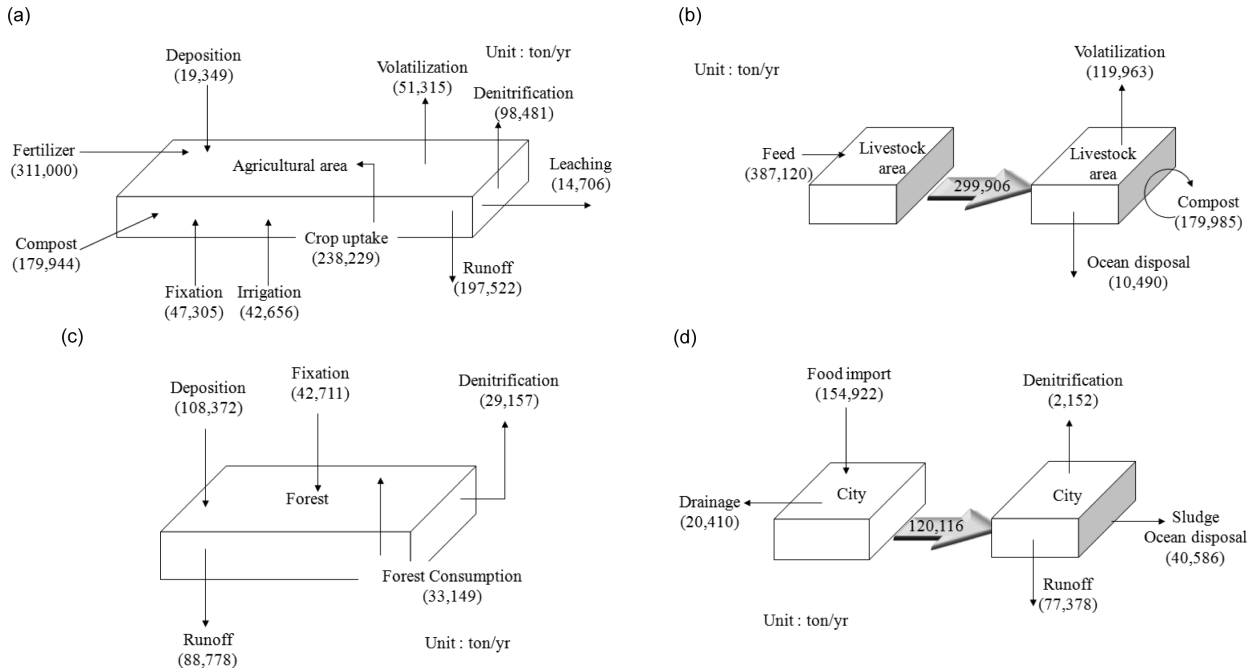


Fig. 5. Input and output budget of nitrogen in: (a) agricultural area, (b) livestock, (c) forest, (d) cities in Korea in 2008.

42,738 ton/yr로 조사되었으며, 하수처리장에서 강과 바다로 유출되는 질소의 양은 77,378 ton/yr로 추정된다.

토지이용에 따른 2008년도의 비점오염은 농업지역, 임야 지역, 그리고 도시지역은 각각 197,522 ton/yr, 88,778 ton/yr, 20,410 ton/yr로 추산되었다(Table 5). 비점오염 중 축산 지역은 축산농가의 97.6%가 축산분뇨처리시설을 갖춰 비점오염에 의한 질소유출은 없는 것으로 가정하였다. 질소비료의 사용량 감소 정책, 하수도정비사업 등의 정책시행을 통하여 비점오염의 저감을 추진하고는 있지만 농업지역의 잉여 질소비료에 의한 비점오염은 전체 비점오염의 약 64%에 해당하는 것으로 조사되었다.

2008년도 질소수지를 기존의 2005년 질소 수지와 상호 비교 및 분석한 결과, 2008년도에 총 유입된 질소는 2005

Table 5. Estimated NPS in the this study at 2008 and the Yoon et al (2008) at 2005

Land used	2005 (kton/yr)	2008 (kton/yr)	Increment (kton/yr)
Agricultural area	124,302	197,522	73,220
Forest area	96,456	88,778	-7,678
Urban area	29,823	20,410	-9,413
Livestock farming area	0	0	0
Total	262,815	306,710	43,895

년 질소수지 보다 25,000 ton/yr이 저감된 것으로 조사되었다(Table 6). 총 유입 질소의 감소는 2005년에 비하여 경작지 감소, 질소비료 사용량 감소, 그리고 국토 개발 등으로 인한 임야지역의 감소한 결과로 사료된다. 또한, 2008년 총

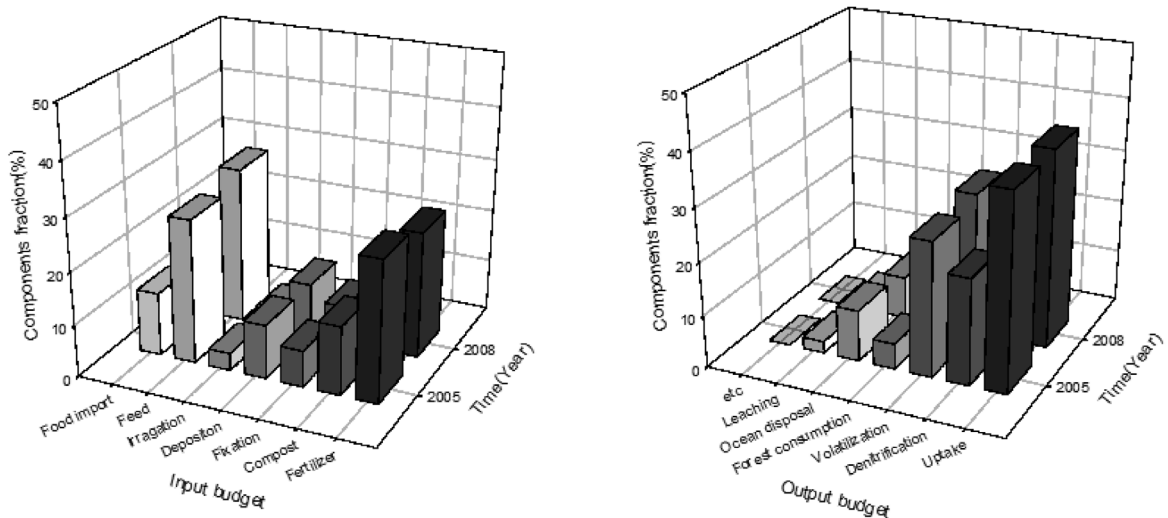


Fig. 6. Comparison of nitrogen budget in the present study with the previous study by Yoon et al (2008).

유출되는 질소는 2005년 질소수지 보다 43 ton/yr이 저감되었다. 총 유출 질소의 감소는 2005년에 비하여 영양물질 흡수량과 해안에서의 질소 유출의 감소가 큰 비중을 차지하였으며, 이는 농경지 감소에 의한 농작물 생산량 감소와 더불어 해양투기량의 감소에 의한 것으로 판단된다(Fig. 6). 질소비료의 사용량에 있어서 농림수산물부는 2013년까지 1999년에서 2003년 사용된 질소비료량의 40%까지 감축하기로 하였으며, 국토해양부는 육상 폐기물을 2011년까지 2005년의 절반 수준인 400만 m³ 이하로 감축하는 육상 폐기물의 해양배출 개선대책을 시행하고 있다. 향후 질소비료의 감축과 폐기물의 육상 처리우선 원칙(감량, 재활용, 소각/매립, 해양배출) 등과 같은 정부시책변화에 따른 질소 유출량은 더욱 감소할 것으로 판단된다.

질소수지에 의하여 산출된 비점오염원의 양은 과잉의 질소 비료량과 임야의 감소로 인하여 2005년 262,815 ton/yr에서 2008년 306,710 ton/yr으로 약 18% 증가하였으며, 농업지역에서 발생하는 비점오염원은 전체 비점오염원의 약 64%에 해당하여 농업지역의 비점오염원을 저감하는 대책이 시급한 것으로 조사되었다(Table 5와 Fig. 5). 또한, 질소 수지에서 자연 생태계 내에서 발생하는 N₂O는 2005년 8,721 ton/yr에서 2008년 8,289 ton/yr로 약 432 ton/yr가 감소한 것으로 조사되었다. N₂O 방출량을 토지이용도에 따라 세분화하여 분석한 결과, 농업지역에서 2005년 토양에 추가된 질소의 총 유입은 527,203 ton/yr에서 2008년 490,944 ton/yr으로 감소하여 농업지역에서 2005년 방출된 N₂O인 6,590 ton/yr에서 2008년 6,137 ton/yr로 저감되었다. 하지만 도시지역의 경우에는 인구증가와 더불어 하수고도처리의 확충에 의하여 2005년 2,131 ton/yr에서 2008년 2,152 ton/yr로 약 21 ton/yr가 증가한 것으로 조사되었다. 따라서 도시지역은 인구 증가와 더불어 강화되는 법적규제치의 영향으로

향후 N₂O 발생량은 더욱 증가할 것으로 예상되며, 하수처리장에서 발생하는 N₂O의 저감방법 및 대책에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 최근 조사된 2005년 질소 유출입 수치¹⁶⁾의 보완 및 개선과 더불어 정책시행의 변화에 따른 2008년 우리나라의 질소 유입 유출수지를 재정립하고자 하였다. 2008년 우리나라로 유입된 총 질소량은 1,294,328 ton/yr이었으며, 기존에 제시된 2005년 질소수지 보다 25,000 ton/yr감소한 것으로 조사되었다. 토지이용에 따른 질소 유출입 수지를 살펴보면, 농업지역에서의 질소 유입과 유출은 600,254 ton/yr과 402,731 ton/yr이며, 비료 및 퇴비로 인한 질소유입이 490,944 ton/yr으로 여전히 많은 질소비료가 사용되는 것으로 확인되었다. 축산업지역에서의 질소유입은 387,120 ton/yr이며 휘발과 해양투기를 고려한 130,453 ton/yr이 유출되는 것으로 나타났다. 임야지역에 유입된 질소는 151,085 ton/yr이며, 88,778 ton/yr은 자연적 유출량으로 추정된다. 도시지역에서 식품수입으로 인한 유입량으로 154,922 ton/yr이며 해양 투기된 슬러지 내 질소와 수계로 직접 유출된 질소는 40,586 ton/yr과 77,378 ton/yr인 것으로 추정되었다.

질소수지에 의하여 산출된 비점오염원의 양은 2005년 262,815 ton/yr에서 2008년 306,710 ton/yr으로 약 22% 증가하였으며, 자연 생태계 내에서 발생하는 N₂O는 2005년 8,721 ton/yr에서 2008년 8,289 ton/yr로 약 432 ton/yr가 감소한 것으로 나타났다. 농업지역과 도시지역에서 발생하는 N₂O는 비료사용량의 감소정책과 하수의 고도처리와 같은 정부시책의 변화에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 향후 인구증가와 하수 고도처리사업소의 증가에 따른 도시지역의 N₂O 발생량은 증가할 것으로 예상된다.

2008년의 질소수지는 2005년 질소수지와 비교하였을 때, 정부의 정책변화에 의한 질소의 유입 유출수지가 변화고 있으며 비점오염원에 의한 유출량에 대해서 더 많은 노력이 필요한 것으로 나타났다. 특히, 폐기물의 최종 과정인 해양투기도 정부의 종합적인 해양투기 관리시책의 변화에 따라 육상 폐기물량을 2011년까지 현재의 절반 수준인 연간 400만 톤으로 줄어든다면, 생태계 내 질소의 흐름은 지속적으로 변화 할 것으로 예상된다.

마지막으로 정확한 질소수지를 위해서는 통계청, 국토해양부의 자료를 통일화할 수 있는 방법이 선행되어야 하며, 유출 질소의 토양 흡수량 및 축적량, 임야 도시지역에서의 지하수 유출량 등에 관한 연구가 미흡하여 제시 못하였기 때문에 여기에 대한 연구와 결과가 보완되면 보다 정확한 수지를 산출할 수 있을 것으로 사료된다.

KSEE

Table 6. Comparison of the this study at 2008 with Yoon et al at 2005

Item	2005 (kton/yr)	2008 (kton/yr)	Increment
Total	1,319	1,294	-25
Fertilizer	354	311	-43
Compost	173	180	7
Fixation	92	90	-2
Depositon	136	129	-7
Irragation	44	42	-2
Feed	361	387	26
Food import	159	155	-4
Total	675	632	-43
Uptake	251	238	-13
Denitrification	137	129	-8
Volatilization	173	171	-2
Forest consumption	33	33	0
Ocean disposal	66	51	-15
Leaching	15	14	-1

참고문헌

1. 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).
2. Smil, V., "Global population and the nitrogen cycle," *Scientific American*, 76~81(1997).
3. 이연, 박양호, 김석철, "작물재배시 대기중으로의 질소손실에 관한 연구," 농업과학기술원, pp. 477~498(2004).
4. 농림수산식품부포털사이트, <http://www.mifaff.go.kr/>(2010)
5. 조성수, 강경훈, 서민혜, 윤용승, "Non-CO₂ 기술전망; N₂O 저감기술과 관련 CDM 사업 현황," 한국공업학회지, **12**(3), 1~13(2009).
6. 박운지, 김동욱, 한수철, 이상명, 이찬기, "강우시 비점오염물질의 유출특성," 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, pp. 1020~1025(2006).
7. 양해근, "강우시 비점오염물질의 유출특성에 관한 연구," 대한지리학회지, **41**(4), 418~434(2006).
8. 최의소, 김태훈, "질소수지 분석을 통한 질소 배출량의 추정," 환경정책연구, **3**(1), 95~117(2004).
9. 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).
10. 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," *Nut. Cycling in Agroecosystems*, **63**, 187~195(2002).
11. Boyer, E. W., Goodale, C. L., Jaworski, N. A. and Howarth, R. W. "Anthropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern U.S.A.," *Biogeochem.*, **57**(58), 137~169(2002).
12. Xing, G. X. and Zhu, Z. L., "Regional nitrogen budgets for china and its major watersheds," *Biogeochem.*, **57**(58), 405~427(2002).
13. 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).
14. 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).
15. 강필구, 이상원, 박혜경, 변명섭, 공동수, "충주호 퇴적물에서의 인과 질소 용출에 관한 연구," 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, pp. 1231~1241(2006).
16. 윤동민, 박신형, 박재우, "2005년 대한민국 질소 유입 및 유출 수치," 대한환경공학회지, **30**(1), 97~105(2008).
17. 김민경, 노기안, 박성진, 최철만, 고병구, 윤순강, 이종식, "충남 고성천 유역의 하천 수질 평가를 이용한 유역단위 질소와 인 수치 분석," 한국환경농학회지, **28**(1), 32~37(2009).
18. 김현수, 김진수, 김영일, 정병호, "논의 영양물질 배출부하특성과 수질정화 기능 분석," 한국관개배수학회지, **11**(1), 34~44(2004).
19. 환경부, "2009 환경통계연감," 환경부(2009).
20. 농림수산식품부, "2009 농림통계연보," 농림수산식품부(2009).
21. 국토해양부, "2009 지적통계연보," 국토해양부(2009).
22. 박운지, 김동욱, 한수철, 이상명, 이찬기, "강우시 비점오염물질의 유출특성," 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, pp. 1020~1025(2006).
23. 양해근, "강우시 비점오염물질의 유출특성에 관한 연구," 대한지리학회지, **41**(4), 418~434(2006).
24. 통계청포털사이트, <http://www.kpstat.go.kr/>(2010)
25. 국토해양부포털사이트, <http://www.mltm.go.kr/>(2010)
26. 한국농어촌공사, "2009 농업생산기반정비사업통계연보," 한국농어촌공사(2009).
27. 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)," *The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, **153**, 63~72(1991).
28. 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).
29. 이영희, "한반도에서의 질소침착량의 추정," 박사학위 논문, 서울대(2002).
30. 노기안, 김민경, 이병모, 이남중, 서명철, 고문환, "벼농사에서 질소유출이 수질에 미치는 영향평가," 한국환경농학회지, **24**(3), 270~279(2005).
31. 김진호, 최철만, 김원일, 이종식, 정구복, 신중두, 성정숙, 이정택, 윤순강, "농업용수 수질관리를 위한 미세조류의 활용," 한국환경농학회지, **26**(1), 7~16(2004).
32. 심재면, 박순용, "남한 산림의 질소와 염기성 양이온의 흡수량 추정," 한국생태학회지, **24**(1), 51~59(2001).
33. 한국보건산업진흥원, "국민건강영양조사 2008", 한국보건산업진흥원(2009).
34. 김창길, 김태영, 신용광, 강창용, 허장, 노기안, 최지용, 한대호, "친환경농업체제로의 전환을 위한 전략과 추진방안," 한국농촌경제연구원(2004).
35. 해양경찰청, "2009 해양경찰백서," 해양경찰청(2009).
36. 농림수산식품부, "가축분뇨 처리 시책," 농림수산식품부(2009).
37. 농림수산부 환경부 합동, "가축분뇨 관리·이용종합대책," 농림수산부 환경부 합동(2009).
38. 고지연, 이재생, 정기열, 최영대, 이동욱, 윤용수, 김춘식, 박성태, "배수 개선처리에 따른 토양 투수속도 변화가 논에서 CH₄ 및 N₂O 배출에 미치는 영향," 한국토양비료학회지, **40**(3), 214~220(2007).
39. Ko, J. Y. and Kang, H. W., "The effects of cultural practices on methane emission from rice paddy field," *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **58**, 311~314(2000).
40. 송주호, 김창길, 허덕, 임성진, "가축 사육두수 총량제의 도입 방안에 관한 연구," 한국농촌경제연구원(2004).
41. 폐기물 종합정보 웹사이트, <http://www.biocycle.org/>(2010).
42. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), "Climate Change 2001: The scientific basis," Cambridge University PRESS, Cambridge, UK.(2001).
43. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), "Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Re-

- ference manual,” IPCC(1996).
44. 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).
 45. Bouwman, A. F., “Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils,” *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **46**, 53~70(1996).
 46. 환경부, “국가하수도종합계획(‘07~‘15),” 환경부(2007).
 47. 양형재, 박정민, 김민정, “하수처리 공정별 아산화질소(N₂O) 배출계수 산정,” *대한환경공학회지*, **30**(12), 1281~1286(2008).
 48. 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).