

## 2005년 대한민국 질소 유입 및 유출 수치

윤동민 · 박신형 · 박재우<sup>†</sup>

한양대학교 토목공학과

(2007년 9월 4일 접수, 2008년 1월 10일 채택)

## Nitrogen Budgets for South Korea in 2005

Dong-Min Yun · Sin-Hyung Park · Jae-Woo Park<sup>†</sup>

Department of Civil Engineering, Hanyang University

**ABSTRACT** : Nitrogen budgets in Korea in 2005 were estimated using a mass balance approach. Major nitrogen fluxes were divided into three sections: cities, agricultural area, and forest. Nitrogen inputs were chemical and biological fixation, dry and wet deposition, imported food and feed, while crop uptake, volatilization, denitrification, leaching, runoff, and forest consumption were nitrogen outputs. Non-point source(NPS) pollution budgets were also estimated by mass balance approach. Annual total nitrogen inputs budgets were 1,442,254 ton · yr<sup>-1</sup>, and outputs were 814,415 ton · yr<sup>-1</sup>. Approximately 19.4% of nitrogen input leaked to river and seawater as NPS pollution. It contains nitrogen input 21 percent more than the previous research in 2002. Especially the change of government plans affect nitrogen budget. As a result, in the output field, the whole nitrogen amount due to landfill reduce from 20 percent to less than 1 percent.

**Key Words** : Nitrogen, Mass Balance, Nonpoint Source Pollution, South Korea

**요약** : 본 연구에서는 기존의 질소 수치에 관한 연구를 바탕으로, 우리나라의 2005년 질소의 총 유입과 유출을 수치분석 방법을 이용하여 추정하였다. 전체의 양을 정확히 추정하는 것은 불가능하지만 사용할 수 있는 데이터 수치를 활용하여 대략적인 질소의 유·출입의 양을 산출하였다. 주요 질소 흐름을 도시계, 농·축산지역, 임야의 세 부분으로 나누어 그 양을 각각 산정하였으며, 질소의 주요 유입으로는 화학적, 생물학적 질소 고정, 건식 및 습식 침착량, 해외로부터 수입된 양 등이 있으며, 유출된 양은 작물흡수, 휘발, 탈질, 침식, 표면유출, 산림소비, 질소산화물(NOx) 소비량 등으로 결정하고 그 양을 추정하였다. 그 외 추정 불가능한 비점오염원에 의한 오염량을 물질 수치 분석방법으로 양을 추정하였다. 연간 질소의 총 유입량은 1,442,254 ton · yr<sup>-1</sup>이며, 총유출량은 814,415 ton · yr<sup>-1</sup> 이었다. 질소 수치 분석하여 연간 발생한 비점오염원의 양을 추정해본 결과 유입질소의 19.4% 정도의 질소가 강 또는 바다에 흘러들었다. 유사한 시도로서는 가장 최근에 이루어진 2002년도에 연구되었던 질소 유입량에 비해서 21% 많은 양으로 조사되었으며, 특히 정부 정책의 변화가 질소 수치에 영향을 미쳐 유출분야에서는 매립에 의한 질소량이 전체 유출 질소량의 20%에서 1% 미만으로 줄어들었다.

**주제어** : 질소, 수치, 비점오염원, 대한민국

### 1. 서론

질소는 자연생태계인 대기, 물, 토양, 생물 영역에서 질소 기체(N<sub>2</sub>), 암모늄 이온(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 질산성 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 아질산성 질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) 형태로 서로 고정, 질산화, 무기화, 탈질화 작용을 거쳐 자유롭게 순환하며,<sup>1)</sup> 존재형태와 역할에 따라 인류의 식량생산에 중요한 역할을 한다. 수중에서 영양소로 작용하는 질소는 수생 식물과 미생물의 생육을 촉진해 수중의 산소함량을 낮춰 부영양화나 적조 같은 수질오염을 일으키는 주요원인으로 작용하며,<sup>2)</sup> 아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 대기 중에서는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 더불어 지구 온난화를 일으키는 온실 가스로 작용하기도 한다.<sup>3)</sup>

인류활동으로 인한 인공 비료 사용의 증가에 의한 질소의 유입이 많아지고, 자동차 배기가스에서 생성된 N<sub>2</sub>O, NOx와 같은 질소산화물의 유입이 크게 늘어 전체 질소의 순환이 1980년도에 비해 크게 달라졌다.<sup>4)</sup> 특히 우리나라의 경우, 농경지로의 연간 비료투입량이 많은 나라로 분류되며,<sup>5)</sup> Fig. 1에서 볼 수 있듯이 전체 질소 유입량은 물론, 단위면적당 사용하는 비료의 양이 세계적으로도 매우 높다.<sup>5)</sup> 표준시비량보다 많은 비료 사용량은 잉여 질소를 발생시키며 강우 시 강과 바다로 흘러들어 가 수질오염의 원인이 된다.<sup>5)</sup>

물질 수치분석방법의 기본원리는 유입된 질소의 양과 배출 및 사용된 질소의 양은 동일하다는 것이며, 전 세계적으로 각 나라의 질소의 순환을 이해하는데 많이 사용되었으며,<sup>6~11)</sup> 특히, 하천, 분수계,<sup>9)</sup> 호수<sup>12)</sup> 등 분석하고자 하는 공간적 영역의 설정에 따라 질소 수치 분석이 다양하게

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: jaewoopark@hanyang.ac.kr

Tel: 02-2220-1483

Fax: 02-2293-9977

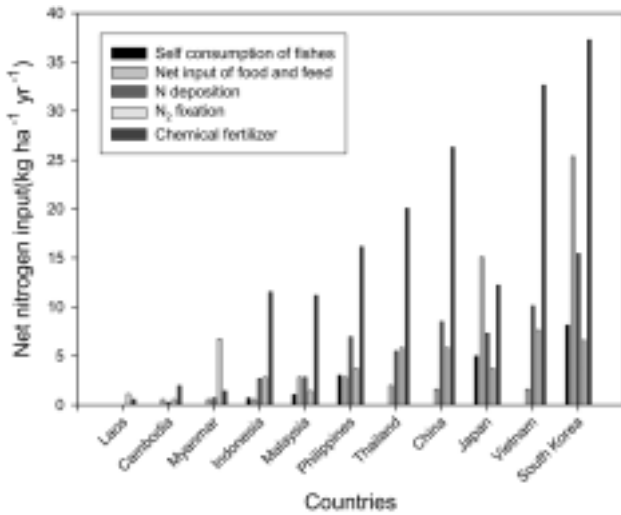


Fig. 1. Composition of net nitrogen input for each east asia countries.

시도되었다. 수치 분석 방법은 질소 동태연구 측면에서 효율적인 질소 관리 방안이며, 작제는 특정 지역에서부터 크게는 국가 등의 전체 질소의 양을 파악할 수 있는 효율적인 방법이다.

우리나라에서 국가적인 규모에서의 질소 수지에 관한 연구는 이전에 두 차례 진행되었다. 1994~1997년 사이의 남한과 황해지역의 질소 수치 연구<sup>6)</sup>가 있었으며, 2001년의 질소 배출량을 추정한 연구<sup>13)</sup>가 있었다. 또한 지역규모의 질소 흐름에 관한 연구<sup>14)</sup>가 진행되었으며, 질소의 유출입 양이 많은 논·밭의 영양물질 배출 부하 특성을 파악한 연구<sup>15)</sup> 등이 발표되었다. 국가 규모의 질소 수지의 두 연구는 IPCC guideline을 토대로 질소 수지를 산정하였으며 당시 국내 연구자료가 부족하여 외국자료의 도입으로 인해 국내 실정에 맞지 않는 수치도 있었다. 또한 정부의 새로운 정책과 방침으로 질소의 유출 흐름이 달라져서, 새로운 통계자료와 문헌자료를 바탕으로 기존 연구의 결과를 보완하고 수정하며, 주기적으로 한국의 질소 수지를 개선하며, 남한 전체 질소의 유입과 유출의 경향을 파악하는 것은 중요하다. 따라서 본 연구는 2007년에 찾을 수 있는 가장 최근인 2005년의 질소 수지를 정량화하여 기존의 연구와 비교·분석하여 우리나라의 질소 수치 경향을 판단하는 것을 목표로 하였다.

## 2. 연구방법

질소 수치 분석에 필요한 통계 수치 및 자료를 최대한 국내 연구 자료를 기초로 하였다. 질소의 물질 수지량을 산정하기 위해 기존의 남한에 관한 연구의 결과를 바탕으로 사용할 수 있는 정부 산하 기관에서 발간된 각종 통계자료 및 문헌자료를 이용하였다.<sup>16-18)</sup> 인구, 국토이용비율, 비료 사용량, 각종 별 가축 수, 연료소비량 등 각종 통계수치는 환경통계연감,<sup>16)</sup> 농림통계연보<sup>17)</sup>을 활용하여 2007년 현재 얻을 수 있는 가장 최근 자료인 2005년을 기

준으로 사용하였다. 남한 지역 전체의 질소 유입과 유출의 양을 측정하기 위해서 배출특성이 다른 세 가지 환경인 도시계, 농업 및 축산업지역, 산지 지역으로 구분하여 분석하였다. 사람이 생활할 수 있는 모든 공간을 도시계로 하며, 농업 및 축산업 지역은 다시 논, 밭, 축산업으로 나누어 질소의 유입 및 배출 특성을 분석하였다. 질소의 유출이 많이 발생할 수 있는 하수처리장 및 축산폐수처리장을 고려하여 질소의 탈질량, 휘발량, 해양 투기량을 분석하였다. 질소 수지를 정량화하고 보편적으로 활용하기 위해서 일반적인 평균값 및 중간값을 주로 사용하였다. 연간 단위 면적당 질소 유입 및 유출량과 면적으로 연간 질소 유입량 및 유출량을 산정했으며, 유출에 해당하는 항목의 비율을 고려하여 유출량을 산정하였다. 총 질소의 물질 수지량의 단위를 기존연구에서 많이 사용하는  $kg \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ 과 총량은  $ton \cdot yr^{-1}$ 로 나타내었다.

### 2.1. 질소 유입 산출 방법

본 연구에서 고려된 질소의 유입과 유출요소를 Table 1에 제시하였다. 세 가지 각 환경으로 질소 유입원의 형태가 다르며, 도시계의 토양은 불투수성 포장이 되어있어 질소가 침착되거나 고정되기 힘들고, 인구가 밀집되어 있어 식료품으로의 질소 유입(food)이 주가 된다. 농업 및 축산업 지역은 건식 및 습식을 포함한 대기로부터의 질소 침착량(deposition), 질소 고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량(fixation), 수입 또는 국내에서 생산된 비료에 의한 토양으로 유입량(fertilizer), 미처리된 가축분뇨에 의한 유입 및 퇴비로의 재사용량(compost), 관개용수에 의한 토양으로 질소 유입에 의한 유입(irrigation)을 고려하였다. 임야지역은 특별한 질소 유입원이 없으므로 침착 및 고정량을 대상으로 하였다.

Table 1. Composition of nitrogen input and output in this study

|                    | City | Agriculture | Forest |
|--------------------|------|-------------|--------|
| Fixation           |      | +           | +      |
| Fertilizer         |      | +           |        |
| Deposition         |      | +           | +      |
| Irrigation         |      | +           |        |
| Food import        | +    |             |        |
| Uptake             |      | +           | +      |
| Denitrification    |      | +           | +      |
| Volatilization     |      | +           | +      |
| Runoff             | *    | *           | *      |
| Forest Consumption |      |             | +      |
| Leaching           |      | +,*         |        |
| NOx emission       | +    |             |        |
| Ocean disposal     | +    | +           |        |
| Food waste         | +    |             |        |

\*: NPS

### 2.2. 질소 유출 산출 방법

질소의 유출은 농업지역에서는 작물에 의한 영양물질 흡수량, 토양에서의 탈질량 및 토양으로 축적된 양으로 질소 유출량을 추정하였으며, 축산업에서는 가축 분뇨의 발생량 중 휘발되거나 탈질된 양, 퇴비로 재사용된 양을 고려하였다. 임야지역에서 질소의 발생은 탈질량으로 고려하였다. 도시계에서는 인체에서 사용된 질소 이외에 하수처리장에서 처리되어 배출된 양과 음식물 쓰레기형태로 배출되는 질소량을 고려하였다. 분뇨 처리과정에서 발생된 휘발량 및 유출량, 도시계와 가축분뇨의 처리시설의 하수처리장 및 축산폐수처리장에서의 휘발 및 탈질된 양을 유출량으로 산정하였다. 대기 중에서 N<sub>2</sub>가 유입되어 고온, 고압으로 인해 N<sub>2</sub>O나 NO<sub>x</sub>로 변형되는 자동차 또는 공장지역에서의 N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>의 기체 형태로 배출되는 양을 산정하여 온실효과를 일으키는 질소산화물의 양을 산정하였다.

### 2.3. 비점오염원량 산출 방법

점원오염원 처리시설이 상당 부분 정비되면서 비점오염원이 강 또는 호소의 수질에 미치는 영향이 증가하였다. 비점오염원은 강우의 초기단계에서 발생하는 오염원으로 예측 불가능한 자연조건에 의해 발생하므로 비점오염원에 대한 유기물질에 대한 정량적 분석이 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 현재 우리나라에서 소규모 지역에서의 비점오염원에 대한 연구<sup>19,20)</sup>는 시행되고 있으나, 우리나라 전체에서 배출되는 비점오염원의 양을 실측한 결과를 얻는 것은 현재로서는 불가능하였다. 따라서 질소 수지를 이용하여 비점오염원 양을 산출하였다. 도시계의 축적된 오염물질의 증가와 농업지역의 필요 이상의 시비량과 관개용수의 사용, 축산분뇨의 무단 방출이 비점오염원의 주원인이며, 도시계, 농업 및 축산지역, 임야에서의 질소 유입 및 유출 수지를 고려하여 비점오염원 양을 산정하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1. 주요 통계 자료

2005년 남한의 인구는 약 48,294천 명이며, 국토면적은 9,964,616 ha이며 이 중 논이 1,104,811 ha, 밭이 719,228 ha로 이는 전체 국토면적의 18.3%이었다. 임야는 6,393,949 ha로 64.2%의 가장 큰 비율을 차지했다. 주요 가축의 수는 한우 1,818,549마리, 젓소 478,865마리, 돼지 8,961,505마리, 닭 109,627,646마리로 추정된다.<sup>17)</sup> 국민 1인당 단백질 섭취량은 75.8 g · day<sup>-1</sup><sup>21)</sup>이며, 단백질 중 질소 함량은 16%이다. 식량 자급률은 25.6%이었다.

### 3.2. 질소 유입

인공적인 질소 고정(artificial fixation) 인 비료는 2005년 총 3,949,705 ton · yr<sup>-1</sup>이 생산되었으며 이 중 질소 함량은

766,632 ton · yr<sup>-1</sup>이었다. 연간 국내에서 시판분을 포함하여 소비된 비료 중 질소함량은 354,173 ton · yr<sup>-1</sup>이었다. 따라서 비료로 인한 국내 농경지의 질소 유입량은 194 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>으로 추정하였다.

질소 고정 박테리아의 생물학적 질소 고정량은 논에서 25~45 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>으로 다양한 연구결과가 발표되었으며,<sup>11,22,23)</sup> 본 연구에서는 중간값인 35 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>로 값을 사용하여, 연간 총 38,668 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출하였다. 밭에서 질소 고정 비율은 15 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup><sup>13)</sup>으로 연간10,788 ton · yr<sup>-1</sup>으로 추정하였으며, 임야는 6.7 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup><sup>13)</sup>으로 연간 42,839 ton · yr<sup>-1</sup>의 질소가 고정되었다.

한국의 연평균 강우량은 1274 mm<sup>24)</sup>인데, 2005년 국토평균 강우량은 1,282 mm이었다.<sup>24)</sup> 따라서, 2005년 침착에 의한 질소 유입량은 연 평균적인 수치로 추정된다. 논에서의 초과 강우량은 머무르지 않고 수계로 바로 유출된다고 가정하여서, 한반도에서의 질소 침착량<sup>25)</sup>을 건식과 습식 모두 고려하여 계절별로 산출하였다(Table 2). 남한의 질소 침착량은 온도가 높은 여름에 가장 많이 유입되었고 겨울에 가장 적은 양이 침착되었다. 연간 질소 침착량은 16.562 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>로 질소 침착이 가능한 농경지 및 임야를 고려하였을 때 총 전체 질소 침착량은 136,106 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출되었다. 논에서의 강우에 의한 질소 유입량은 지역, 시기, 강우량 등에 따라 편차가 크지만 대체적으로 7.1~14.2 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup><sup>15,26)</sup>의 질소가 공급된다. 따라서 논으로 사용되는 토양으로의 질소의 침착량은 11,766 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산정되며, 우리나라의 경우 논이 전체 경작지 중 60.57%를 차지하므로 강우에 의한 경작지로 질소 유입량은 19,426 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출되었다.

관개용수에 의한 질소사용량이 15.2~39.9 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup><sup>15,26,27)</sup>까지 차이가 많이 났다. 관개용수 사용량이 158 억ton · yr<sup>-1</sup>이며, 농업용수의 평균 질소농도인 2.8 mg · L<sup>-1</sup>을 감안하여 관개용수에 의한 질소 유입비율을 24.25 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>으로 산출하였으며, 이 수치는 조사된 문헌의 수치의 평균값인 27.55 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>와 근접한 수치이다. 따라서 연간 총 질소량은 44,233 ton · yr<sup>-1</sup>으로 추정하였다.

축산업에서 사용하는 사료의 소비량은 20,140 kton<sup>28)</sup>이었으며, 사료 내 단백질 함량이 15%이며, 단백질 내 질소 함량을 고려하여 사료로 인하여 축산업으로 유입된 질소는 483,360 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출하였다. 당해 1인당 단백질 섭취량은 75.8 g · day<sup>-1</sup><sup>21)</sup>이며, 이 중 동물성 단백질 섭취

**Table 2.** Estimated dry and wet depositions of nitrogen for each season

|        | Dry(kg · ha <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> ) | Wet(kg · ha <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> ) |
|--------|--|--|
| Spring | 2.814  | 1.288  |
| Summer | 5.950  | 1.946  |
| Autumn | 1.666  | 1.204  |
| Winter | 1.162  | 0.518  |

량은 35.9 g · day<sup>-1</sup>이다. 섭취할 수 있는 단백질이 동물성 단백질과 식물성 단백질이라고 할 때, 연간 동물성 단백질 섭취량은 101,251 ton · yr<sup>-1</sup>이며 식물성 단백질 섭취량은 112,533 ton · yr<sup>-1</sup>이다. 2005년 식량 자급률이 25.6%이므로, 총 질소 섭취 유입원 213,784 ton · yr<sup>-1</sup> 중 식량자급률 이외의 부분인 159,055 ton · yr<sup>-1</sup>이 수입된 것으로 산출하였다.

따라서 2005년 한해 질소의 총 유입은 1,442,254 ton · yr<sup>-1</sup>으로 추정되며, 이중 24.6%가 토양에 뿌려진 비료 및 퇴비이며, 가축으로 유입된 사료의 양이 33.5%이지만 축산분뇨 처리되고 거의 재사용 되므로 질소 오염에 직접적인 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 해외에서 수입되어 식료품으로 소비된 질소가 질소 유입원의 11%이었다.

### 3.3. 질소 유출

2005년 가축분뇨 발생량은 50,593,000 ton · yr<sup>-1</sup><sup>30)</sup>으로 하루에 138,611 ton의 가축분뇨가 발생하였다. 가축분뇨 발생 추정량은 배출원단위를 기준으로 하며 실제 처리량과 다소 다를 수 있다. 예를 들면 돼지에 대한 세정수 사용감소를 고려한다면 20%의 폐수가 줄어든다.<sup>31)</sup> 현재 일정 규모의 가축을 사육하는 축산농가는 축산폐수 처리시설이 의무화되어서, 축산농가의 97.6%가 축산분뇨처리시설을 갖추었으며, 정상적으로 가동하는 처리시설은 97.5%로 조사되었다. 퇴비, 액비, 퇴 · 액비로의 자원화 처리가 각각 79.6%, 3.5%, 8.5%을 차지하였으며 축산분뇨의 정화처리는 8%를 차지하였다.<sup>32)</sup> 당해 해양투기 된 폐기물이 9,929,000 ton · yr<sup>-1</sup><sup>33)</sup>이었으며 이 중 축산분뇨는 27.6%<sup>34)</sup>로 2,745,000 ton · yr<sup>-1</sup>로 산정되었다. 가축분뇨 중 질소 발생량은 2003년 가축분뇨 양분발생량<sup>31)</sup>과 가축 증가율을 고려하여 추정하였다. 생분뇨는 288,384 ton · yr<sup>-1</sup>이며 자원화 과정 중 질소 휘산 40%을 고려하여 퇴 · 액비화된 가축분뇨는 173,029 ton · yr<sup>-1</sup>으로 추정하였다. 가축분뇨 처리를 규제하지 않고, 신고하지 않은 농가까지 포함하면 이보다 더욱 많은 양으로 추정된다.

농경지에서 가장 큰 질소의 유출은 작물에 의한 영양물질 흡수량이다. 논에서의 질소 수지를 연구한 자료<sup>4,13~15)</sup>에서의 시비 질소와 작물 생산량과의 관계를 보면 작물 생산량은 질소양분의 공급이 증가함에 따라 그 양이 일정해지는 경향을 나타낸다(Fig. 2). 따라서 표준시비량보다 많은 질소비료를 사용하여도 작물로 흡수되는 질소의 양은 일정해져서 과잉질소가 수계로 유출될 수밖에 없다. 질소의 작물 흡수는 비료량 및 강우량, 온도 등 기후에 많은 영향을 받으므로 연구 방법에 따라 질소 유입량과 작물 흡수량의 수치의 오차가 매우 크다. 연간 생산된 농산물 수확량 중 질소(Table 3)로 산정하여 보면 총 278,522 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출된다. 또한 경작지로의 유입질소의 61.7%가 흡수되므로<sup>15)</sup> 작물흡수로 유출된 질소량은 395,070 ton · yr<sup>-1</sup>이다. 따라서 평균값인 336,796 ton · yr<sup>-1</sup>로 산출하였다.

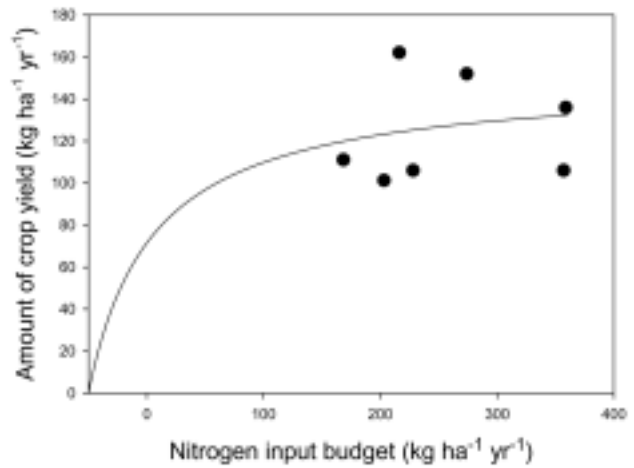


Fig. 2. Relationship between amount of crop uptake yield and nitrogen input.

Table 3. Estimated Nitrogen in agricultural production of Korea in 2005

|            | Annual production(ton) | g protein · kg <sup>-1</sup> | Nitrogen(ton) |
|------------|------------------------|------------------------------|---------------|
| Rice       | 16,336,132             | 88                           | 230,013       |
| Barley     | 472,584                | 92                           | 6,956         |
| Bean       | 198,752                | 330                          | 10,494        |
| Grain      | 86,366                 | 106                          | 1,465         |
| Roots      | 1,176,741              | 19.6                         | 3,690         |
| Vegetables | 9,610,580              | 15                           | 23,065        |
| Fruit      | 2,956,772              | 6                            | 2,839         |
| Total      |                        |                              | 278,522       |

토양에서 질소의 탈질에 관한 연구는 질소의 다른 흐름에 비해 상대적으로 여러 연구가 진행되었으며, 이에 따라 질소 탈질의 양의 추정도 연구마다 다른 경향이 있다. 본 연구에서는 기존 탈질의 관한 연구 중 우리나라 실정에 가장 적합한 값을 추정하고자 하였다. 논인 경우 비료 사용량의 32%가 탈질되며, 밭의 경우에는 15%가 탈질된다고 알려져 있다.<sup>6)</sup> 또한, 논에서 30~70 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>,<sup>35)</sup> 밭에서 30 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup><sup>35)</sup> 정도의 질소가 탈질된다고 하였다. 두 가지 방법으로 탈질량을 산정하여 보면 76,817~133,336 ton · yr<sup>-1</sup>의 질소가 탈질량으로 산출된다. 따라서 질소 수지 산정 시 탈질량은 평균값인 105,092 ton · yr<sup>-1</sup>로 추정하였다. 임야지역에서 탈질은 연구마다 크게 차이가 나는 경향이 있으며 유입질소량의 15~20%의 양이 탈질되거나, 작계는 0.88 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup><sup>35)</sup>에서 많게는 10 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup><sup>36)</sup>까지 차이가 나며, 이 값 중 평균값인 5 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>로 가정하여 산정하면, 임야지역에서의 탈질소량은 27,916~31,970 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산정하였다. 따라서 임야지역에서의 탈질량은 29,943 ton · yr<sup>-1</sup>이며, 총 기체상태로 탈질 되는 총량은 137,173 ton · yr<sup>-1</sup>로 산출하였다.

질소의 휘발은 주로 가축분뇨에 의한 휘발, 농경지에서 비료에 의한 휘발량 등이 있다. 기타 발생할 수 있는 질소 휘발량은 그 양이 극히 적으므로 무시하였다. 가축분뇨

의 퇴비화 과정에서 질소양분이 약 40% 휘산<sup>37)</sup>되므로 그 양은 115,354 ton · yr<sup>-1</sup>이며 농경지에서는 시비량의 16.5%<sup>15)</sup>가 휘발되므로 그 양은 58,439 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출하였다.

농경지에서 토양표면으로 유입된 질소가 토양을 통해 지하수로 유출되는 양은 유입된 총 질소의 1.6~3.3%<sup>15,26)</sup> 정도이다. 따라서 평균값인 2.45%로 산출하면 총 15,688 ton · yr<sup>-1</sup>이 지하로 유출된다. 지하로 유출된 질소는 지하수를 오염시키는 직접적인 원인이 되며 한번 오염된 지하수는 복원하기 어려운 점이 있다. 산림에서의 침엽수와 활엽수 및 혼합림의 줄기와 가지의 생장에 의한 단위 면적당 평균 질소 흡수량은 4.9 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>이며 수확량은 0.28 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>으로 보고되었다.<sup>38)</sup> 따라서 연간 임업지역에서 질소의 흡수량은 33,121 ton yr<sup>-1</sup>으로 산출하였다.

1997년에 개정된 폐기물관리법에서 2005년 1월 1일부터 특별시, 광역시, 시 지역에서 발생하는 음식물류 폐기물을 바로 매립하여서는 안되며, 소각 · 퇴비화 · 사료화 또는 소멸화 처리 후 발생하는 잔재물만 매립하도록 하였다. 따라서 음식물 쓰레기의 발생량이 전년도에 비해 증가한 것을 알 수 있다(Fig. 3). 도시계를 포함한 생활계에서 발생하는 음식물 폐기물의 발생량은 12,977 ton · day<sup>-1</sup><sup>39)</sup>이었다. 처리방법은 93.8%가 재활용, 매립 2.5%, 소각 3.7%이었다. 음식물 폐기물은 자원화 과정인 사료화, 퇴비화를 거쳐 재활용되었으며, 음식물 쓰레기의 발생원에 따라 질소함량이 2.1~4.1%까지 다양하게 나타나며 평균적으로 3.7%의 질소를 함유하고 있다. 자원화된 음식물 쓰레기의 60%가 사료로 사용되며, 24%는 퇴비, 16% 정도 기타 다른 목적에 사용된다. 자원화된 퇴비 및 사료는 농업과 축산업에 질이 나쁜 문제로 판매율이 20%에 그치며, 이 판매율을 재 사용률로 볼 수 있다. 따라서 음식물 쓰레기에서 발생하는 질소량은 175,254 ton · yr<sup>-1</sup>이며, 사료로 21,030 ton · yr<sup>-1</sup> 재사용되며, 비료로 8,412 ton · yr<sup>-1</sup>의 질소가 재 사용된다고 추정하였다.

해양경찰청에서 조사된 해양 투기 된 폐기물의 양이 매년 증가<sup>34)</sup>하고 있으며(Fig. 4), 해양 투기 된 질소는 주로 가축 분뇨 및 하수 슬러지로 구분되며 해양투기 된 가축분뇨의

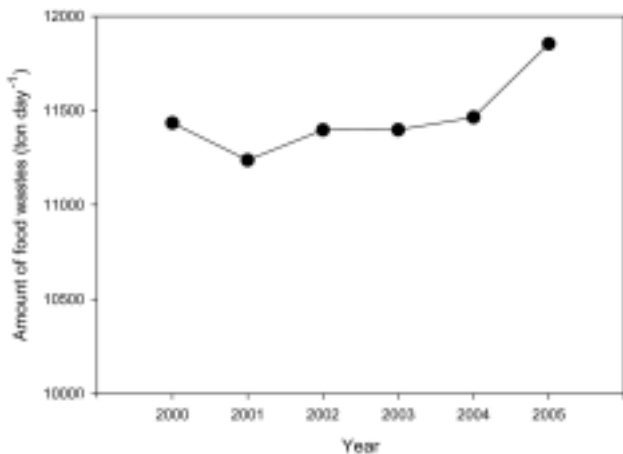


Fig. 3. Total amount of daily food wastes in Korea.

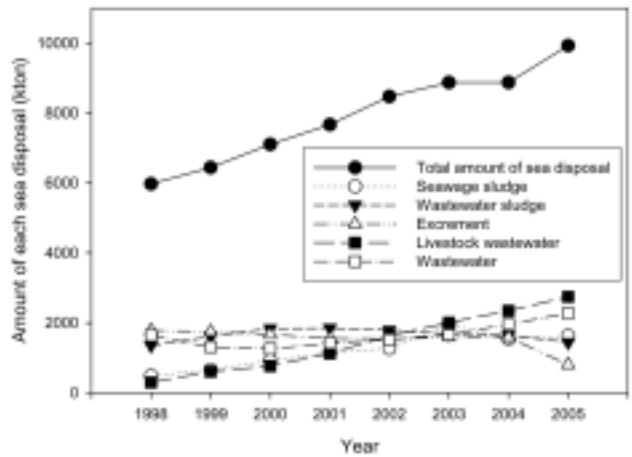


Fig. 4. Amount of sea disposal wastes in Korea.

양은 2,745,000 ton · yr<sup>-1</sup>이며, 질소의 휘발된 양 없이 모두 해양투기 되었다고 하였을 때 유출된 질소는 15,647 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출될 수 있다. 하수처리장에서 배출된 질소를 산정하기 위해 하수처리장으로 유입되는 질소량으로부터 그 배출량을 산정하였다. 단백질은 인간의 체내로 축적되어 10% 정도<sup>13)</sup>가 인체활동에 쓰이며, 우리나라의 하수처리시설의 하수도 보급률은 84.5%이므로, 162,582 ton · yr<sup>-1</sup>의 질소가 하수처리장으로 유입되며 15.5%인 29,823 ton · yr<sup>-1</sup>의 질소가 수계로 직접 유출된다. 시설용량은 하루에 22,568 kton이다. 하수처리 후 발생하는 하수 슬러지는 하루에 7,520 ton · day<sup>-1</sup><sup>40)</sup>이었으며 연간 2,744,800 ton · yr<sup>-1</sup>이 발생하였다. 대부분 해양투기로 발생량의 77% 인 5,417 ton · day<sup>-1</sup>이 이 처리되고 있으며 소각처리는 하루 805 ton(11%), 재활용 처리는 하루 752 ton(10%), 매립처리로 하루 78 ton(1%)이 처리되었다. 슬러지 건조 후 성분분석을 해보면 질소함량이 2~7% 이다.<sup>41)</sup> 따라서 해양 배출된 질소의 양과 소각된 질소의 양은 각각 88,974 ton · yr<sup>-1</sup>, 13,222 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산정하였다. 따라서 해양 배출된 총 질소량은 약 104,621 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출하였다.

하수처리장에서 발생하는 N<sub>2</sub>O량은 식 (3)로 산정할 수 있다. 1인당 단백질 섭취량은 연간으로 계산하면 27.667 kg · capita<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>이며 배출계수는 0.01로 계산하면 총 2,131 ton · yr<sup>-1</sup>이 발생한다.

$$N_2O_{(s)} = \text{Protein} \times F_{NPR} \times NR_{\text{people}} \times EF_6 \quad (3)^{42)}$$

- 여기서, N<sub>2</sub>O<sub>(s)</sub> : 배출량(kg N<sub>2</sub>O-N yr<sup>-1</sup>)
- Protein : 연간 단백질 섭취량
- F<sub>NPR</sub> : 단백질 중 질소 비율
- NR<sub>people</sub> : 총 인구수
- EF<sub>6</sub> : 배출계수(N<sub>2</sub>O-N/kg sewage-N)

폐수처리장과 분뇨처리장에서 발생하는 N<sub>2</sub>O의 양은 하수처리장에서 발생하는 질소의 각각 6%, 0.06% 이내이므로<sup>42)</sup> 그 양을 무시하였다. 자동차 및 공장 굴뚝에서 발생되

**Table 4.** Nitrogen input and output budgets for Korea in 2005

| Major items        | Minor items                  | Total amount (ton · yr <sup>-1</sup> ) | Percentage(%) | Input and output of nitrogen budget   |
|--------------------|------------------------------|--|---------------|---|
| Input              |                              | 1,442,254                              |               |   |
| Fertilizer         | Chemical                     | 354,173                                | 24.6          | Agricultural & Forestry statistical yearbook 2006                                 |
|                    | Compost                      | 173,030                                | 12.0          | 288,384 ton · yr <sup>-1</sup> × 0.6  |
| Fixation           | Faddy field                  | 38,668                                 | 2.7           | 35 kg · ha <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> × 1,104,811 ha                        |
|                    | Upland                       | 10,788                                 | 0.7           | 15 kg · ha <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> × 719,228 ha                          |
|                    | Forest                       | 42,839                                 | 3.0           | 6.7 kg · ha <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> × 6,393,949 ha                       |
| Depositon          |                              | 136,106                                | 9.4           | 16.562 kg · ha <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> × 8,217,988 ha                    |
| Irragation         |                              | 44,233                                 | 3.1           | 24.25 kg · ha <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> × 1,824,039 ha                     |
| Feed               |                              | 483,360                                | 33.5          | 20,140 kton × 0.15 × 0.16   |
| Food import        |                              | 159,055                                | 11.0          | 75.8 g · day <sup>-1</sup> × 48,294 × 365 × 0.16 × 10 <sup>-3</sup>               |
| Output             |                              | 814,415                                |               |   |
| Uptake             |                              | 336,799                                | 41.4          | (278,522 ton · yr <sup>-1</sup> + 395,077 ton · yr <sup>-1</sup> ) × 0.5          |
| Denitrification    | Agriculture                  | 105,092                                | 12.9          | (76,817 ton · yr <sup>-1</sup> + 133,366 ton · yr <sup>-1</sup> ) × 0.5           |
|                    | Forest                       | 28,943                                 | 3.7           | (27,916 ton · yr <sup>-1</sup> + 31,970 ton · yr <sup>-1</sup> ) × 0.5            |
|                    | Wastewater treating facility | 2,138                                  | 0.3           | 27.667 kg · capita <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> × 0.16 × 48,294,000 ha × 0.01 |
| Volatilization     | Compost                      | 115,354                                | 14.2          | 288,384 ton · yr <sup>-1</sup> × 0.4  |
|                    | Fertilizer                   | 58,439                                 | 7.2           | 354,173 ton · yr <sup>-1</sup> × 0.165  |
| Leaching           |                              | 15,668                                 | 1.9           | 640,319 ton · yr <sup>-1</sup> × 0.0245   |
| Forest consumption |                              | 33,121                                 | 4.1           | (4.9 + 0.28)kg · ha <sup>-1</sup> · yr <sup>-1</sup> × 6,393,949 ha               |
| Ocean disposal     |                              | 104,621                                | 12.8          | 88,974 ton · yr <sup>-1</sup> + 15,647 ton · yr <sup>-1</sup>                     |
| Incineration       |                              | 13,222                                 | 1.6           | 805 ton × 365 day × 0.045   |
| Input-Output       |                              | 627,839                                |               |   |

는 NOx의 양은 1,377,526 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산정되었으며 NOx 중 질소의 함량은 30.4%<sup>10)</sup>이므로 대기로 방출되는 질소의 총량은 418,768 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산출하였다.

3.4. 총 질소 균형 수치

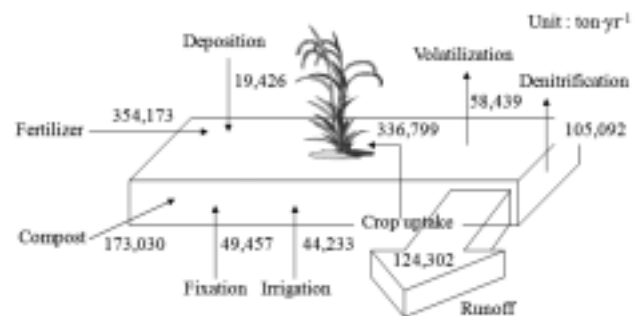
2005년 남한의 질소 유·출입 수치 및 비율 및 산출근거를 Table 4에 정리 하였으며, Fig. 5는 남한 전체의 질소



**Fig. 5.** Input and Output budget of Korea in 2005.

유출입 수치이다. 농 · 축산 지역의 질소의 수지를 Fig. 6과 7에 나타내었다. 농업계의 질소의 총 유입은 640,319 ton · yr<sup>-1</sup>이었으며, 유출량은 516,017 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산정되었다. 124,302 ton의 질소가 수지분석을 통해 농경지에서 잉여질소량으로 강우 시 비점오염원으로 강으로 유출된 것으로 추정하였다. 축산업에서의 사료로 인한 가축들의 질소유입은 483,360 ton · yr<sup>-1</sup>으로 이 중 131,000 ton이 휘발 또는 해양유출로 직접적인 수치 유출량이 되며 173,030 ton은 퇴비로 재사용되었다고 추정하였다.

임야지역에서는 강우에 의한 침착과 고정으로 159,520 ton의 질소가 유입됐으며 탈질과 산림소비로 63,064 ton의

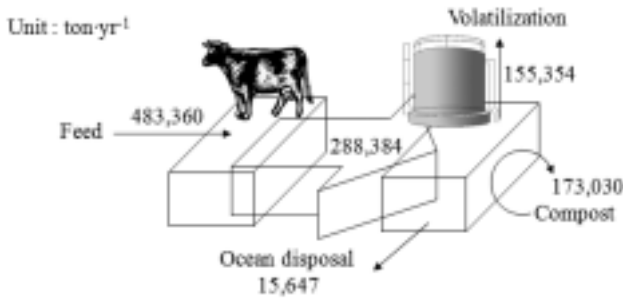


**Fig. 6.** Input and Output budget of nitrogen in agricultural area of Korea in 2005.

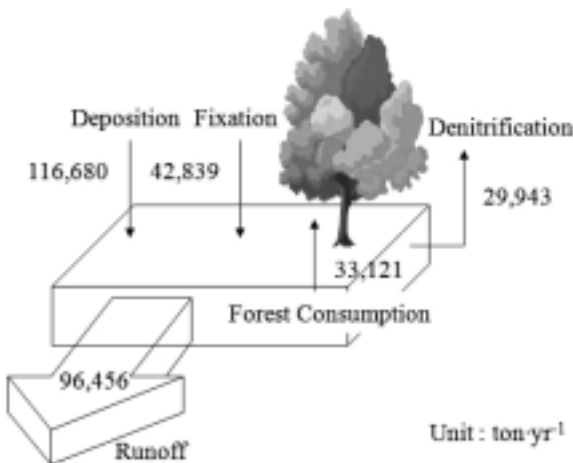
**Table 5.** Comparison of this study with previous study

|                    | Previous<br>(kton · yr <sup>-1</sup> ) | This<br>(kton · yr <sup>-1</sup> ) |
|--------------------|--|------------------------------------|
| <b>Input</b>       | 1,194.5                                | 1,442.3                            |
| Fertilizer         | 375                                    | 354                                |
| Compost            | NC                                     | 173                                |
| Fixation           | 111.5                                  | 92                                 |
| Depositor          | 163.5                                  | 136                                |
| Irrigation         | NC                                     | 44                                 |
| Feed               | 394                                    | 484                                |
| Food import        | 79.5                                   | 159                                |
| Seafood production | 71                                     | NC                                 |
| <b>Output</b>      | 1194.5                                 | 814                                |
| Uptake             | NC                                     | 337                                |
| Denitrification    | 298.5-312.5                            | 137                                |
| Volatilization     | 169                                    | 173                                |
| Forest consumption | NC                                     | 33                                 |
| Ocean disposal     | 408-422<br>(throughout river)          | 105                                |
| landfill           | 242.5                                  | NC                                 |
| etc.               | 62.5                                   | 13                                 |

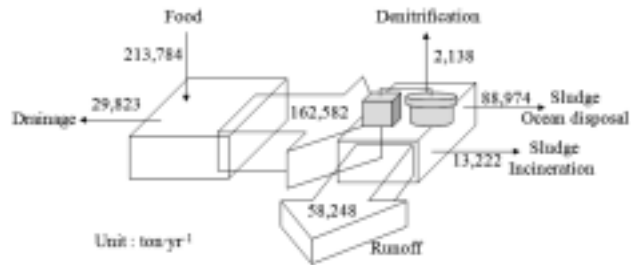
NC: Not Considered



**Fig. 7.** Input and Output budget of nitrogen in livestock industry of Korea in 2005.



**Fig. 8.** Input and Output budget of nitrogen in forest environment of Korea in 2005.



**Fig. 9.** Input and Output budget of nitrogen cities of Korea in 2005.

질소가 유출되었다. 96,456 ton의 질소가 강우 시 비점오염원으로 강으로 유출된 것으로 추정하였다. 임야지역에서의 유입과 유출을 Fig. 8에 도식화하였다.

도시계의 질소 순환 수지를 Fig. 9에 도식하였으며, 음식물 쓰레기로 사전에 배출된 175,254 ton의 질소를 제외하고, 해외에서 수입하여 도시계로 유입된 질소를 포함하여 전체 유입된 질소는 213,784 ton이며 하수도로 수집되지 않은 15.5%은 비점오염원으로 29,823 ton의 질소가 유출되었으며 하수처리장으로 유입되어 탈질조를 거쳐 슬러지의 해양투기 및 소각을 제외하고 강으로 유출된 질소는 58,248 ton이었다.

#### 4. 결론

2005년 한해 우리나라로 유입된 총 질소량은 1,442,254 ton · yr<sup>-1</sup>이었으며, 유출로 산출된 양은 814,415 ton · yr<sup>-1</sup>으로 산정되었다. 이는 기존에 제시된 연구보다 약 21% 많은 값으로 추정된다(Table 6). 이전 연구<sup>13)</sup>보다 질소 침착량과 음식물의 수입 분야에서 많은 양으로 조사되었다. 또한, 퇴비의 재사용량을 추가하여 기존연구보다 많은 양이 산정되었다. 농업지역의 우리나라 토양에 적합한 표준 시비량의 권장으로 질소비료의 사용량이 줄어들고 있으며, 따라서 본 연구에서 산정된 농경지로의 비료 및 퇴비로 인한 질소 유입은 274 kg · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>이다. 하지만 여전히 많은 질소비료의 사용으로 인해 농경지에서의 질소 유출은 124,302 ton · yr<sup>-1</sup>으로 전체 비점오염원 279,006 ton · yr<sup>-1</sup> 중 44.6%를 차지하였다. 사료의 유입량 483,360 ton · yr<sup>-1</sup> 중 194,976 ton · yr<sup>-1</sup>에 해당하는 40.3%가 가축에 축적된 것으로 추정된다. 이전연구에서 고려되지 않은 임야지역에서의 질소 소비량은 전체의 4.1%를 차지하였다. 따라서 임야지역에 유입된 질소 중 96,456 ton · yr<sup>-1</sup>가 수계로 유출된 자연적 유출량으로 추정된다. 정부 정책의 변화로 인해 2005년에 시행된 음식물 쓰레기의 매립 금지로 인해 질소의 토양 축적량이 현저하게 줄었다. 이전 연구에서는 매립에 의한 질소 유출량이 전체 유출량의 20%를 차지했지만 정부시책 변화로 인해 전체 유출량의 1% 미만으로 나타났다. 따라서 적극적인 정부의 질소 관리는 전체적인 질소 흐름을 변화시킬 수 있다. 폐기물의 최종 과정인 해양투기도 정부의 종합적인 해양투기 관리시책으로 바다에

버려지는 육상 폐기물량을 2011년까지 현재의 절반 수준인 연간 400만 톤으로 줄어든다면, 하수오니와 축산분뇨의 해양투기를 전면 금지하였으므로 질소의 흐름은 지속적으로 변할 것이다. 질소유입은 농업계로의 유입이 다른 두 지역에 비해 많으며,  $N_2O$ ,  $NO_x$  량을 포함하여 대기로의 유출이 현저하게 많은 것을 알 수 있었다. 정부의 보다 정확한 통계자료와 실측된 자료가 밀받침된다면 보다 정확하고 자세한 질소 수지를 산정할 수 있을 것으로 본다. 또한 향후에는 지방자치 단체별로 질소 수지를 연구하여 포괄적인 질소 수치 관리가 필요할 것으로 본다.

## 참고 문헌

- Scolow, R. H., "Nitrogen management and the future of food : Lessons from management of energy and carbon," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **96**, 6001~6008(1999).
- Smil, V., "Global population and the nitrogen cycle," *Scientific American*, 76~81(1997).
- Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K., "2006 IPCC Guideline for national greenhouse gas inventories, 1st eds.," Institute for Global Environmental Strategies, pp. 11.5~11.6(2006).
- 이연, 박양호, 김석철, "작물재배시 대기중으로의 질소손실에 관한 연구," 농업과학기술원 pp. 477~498(2004).
- Hatano, T., "Impact of Nitrogen cycling on global warming in agro-ecosystems of East Asia," NIAES International symposium 2006, *National Institute for Agro-Environmental Sciences*, pp. 18~23(2006).
- 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," *Biogeochemistry*, **57**(58), 387~403(2002).
- 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," *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **63**, 187~195(2002).
- Boyer, E. W., Goodale, C. L., Jaworski, N. A., and Howarth, R. W., "Antropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern U.S.A.," *Biogeochemistry*, **57**(58), 137~169(2002).
- Xing, G. X. and Zhu, Z. L., "Regional nitrogen budgets for china and its major watersheds," *Biogeochemistry*, **57**(58), 405~427(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," *Biogeochemistry*, **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," *Biogeochemistry*, **79**, 109~133(2006).
- 강필구, 이상원, 박혜경, 변명섭, 공동수, "충우호 퇴적물에서의 인과 질소 용출에 관한 연구," 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동총계학술발표회 논문집, pp. 1231~1241(2006).
- 최의소, 김태훈, "질소수지 분석을 통한 질소 배출량의 추정," 환경정책연구, **3**(1), 95~117(2004).
- 김창길, 김태영, "친환경농업 시스템 구축을 위한 지역단위 물질균형 분석," 농촌경제, **26**(4), 1~24(2003).
- 김현수, 김진수, 김영일, 정병호, "논의 영양물질 배출부하 특성과 수질정화 기능 분석," 한국관개배수학회지, **11**(1), 34~44(2004).
- 2006 환경통계연감, 환경부(2006).
- 2006 농림통계연보, 농림부(2006).
- 2005 하수도통계, 환경부(2006).
- 박운지, 김동욱, 한수철, 이상명, 이찬기, "강우시 비점오염물질의 유출특성," 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동총계학술발표회 논문집, pp. 1020~1025(2006).
- 양해근, "강우시 비점오염물질의 유출특성에 관한 연구," 대한지리학회지, **41**(4), 418~434(2006).
- 국민건강영양조사 2005, 한국보건산업진흥원(2006).
- 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)," *Trans. Jpn. Soc. Irrigation, Drainage Reclamation Eng.*, **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, pp. 12~25(2003).
- 물포탈 사이트, <http://www.water.or.kr>(2001).
- 이영희, "한반도에서의 질소침착량의 추정," 박사학위 논문, 서울대(2002).
- 노기안, 김민경, 이병모, 이남중, 서명철, 고문환, "벼농사에서 질소유출이 수질에 미치는 영향평가," 한국환경농학회지, **24**(3), 270~279(2005).
- 김진호, 최철만, 김원일, 이종식, 정구복, 신중두, 성정숙, 이정택, 윤순강, "농업용수 수질관리를 위한 미세조류의 활용," 한국환경농학회지, **26**(1), 7~16(2004).
- 유기농종합포털사이트, <http://www.hannong.com>(2006).
- 2007 해양수산통계연보(2007).
- 가축분뇨 해양배출 감축대책, 농림부(2006).
- 가축분뇨 관리·이용종합대책, 농림부 환경부 합동(2004).
- 가축분뇨 처리 시책, 농림부(2005).
- 해양투기 종합관리 시스템, <http://www.oceandumping.re.kr> (2004).
- 2005년 폐기물 해양투기 현황 및 2006년 폐기물 해양투기 억제대책, 해양경찰청(2005).
- 김창길, 김태영, 신용광, 강창용, 허장, 노기안, 최지용,



- 한대호, “친환경농업체제로의 전환을 위한 전략과 추진 방안,” 한국농촌경제연구원(2004).
36. Wolf, I. and Brumme, R., “Dinitrogen and Nitrous Oxide Formation in Beech Forest Floor and Mineral Soils,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **67**, 1862~1868(2003).
37. Medinga, S. M., Morris L. A., Hooverc C. M., Nutterd, W. L., and Cabrerab, M. L., “Denitrification at a Long-Term Forested Land Treatment System in the Piedmont of Georgia,” *J. Environ. Quality*, **30**, 1411~1420(2001).
38. 송주호, 김창길, 허덕, 임성진, “가축 사육두수 총량제의 도입 방안에 관한 연구,” 한국농촌경제연구원(2004).
39. 심재면, 박순용, “남한 산림의 질소와 염기성 양이온의 흡수량 추정,” 한국생태학회지, **24**(1), 51~59(2001).
40. 2005년 폐기물통계 발표, 국립환경과학원(2007).
41. 폐기물 종합정보 웹사이트, <http://www.biocycle.org>(2001).
42. 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).
43. 임재규, 최경식, 김호석, 정용현 “기후변화협약 제 3차 국가보고서 작성을 위한 기반구축연구(제2차년도),” 에너지경제연구원(2005).
44. 농촌경제연구원, “<http://www.krei.re.kr>”(2001).
45. 박양호, “작물양분의 종합관리(INM) 기술체계 확립,” 농업과학기술원(2003).