

## 기체상 질소산화물을 포함한 2011년도 대한민국 질소수지 산정

### 2011 Nitrogen Budget of South Korea Including Nitrogen Oxides in Gas Phase

신진환\* · 유채원 · 안상우 · 박재우†

Jin-Hwan Shin\* · Chae-Won Yoo · Sang-Woo An · Jae-Woo Park†

\*한국교통대학교 토목공학과 · 한양대학교 건설환경공학과

\*Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

(2013년 11월 12일 접수, 2014년 1월 12일 채택)

**Abstract :** The present study estimated nitrogen budget of South Korea including nitrogen oxides (NOx) in 2011. Emission sources of NOx were calculated with the higher contributors, such as vehicles, businesses, power plants, based on the IPCC and EPA reports. Moreover, nitrogen budget was separated for city, agriculture livestock and forest. Input and output were chemical fertilizer, crop uptake, fixation, irrigation, compost, leaching, volatilization, imported food, denitrification, runoff, and so on. Annual nitrogen input were 1,692,650 ton/yr and output were 837,739 ton/yr which were increased from 2010 budget. In 2011, NOx emissions by vehicles, power plants, and businesses were 308,207 ton/yr, 601,437 ton/yr, and 469,946 ton/yr, respectively. Including nitrogen oxide, total nitrogen input and output in 2011 was calculated as 5,652,366 ton/yr and 1,425,371 ton/yr, respectively.

**Key Words :** South Korea, Nitrogen Budget, Nitrogen Oxides, Input and Output

**요약 :** 본 논문에서는 2011년도 대한민국에서 발생된 질소수지에 관한 연구에 기존 연구에서는 포함되지 않았던 질소산화물(NOx)의 발생량을 포함하여 추정하였다. 질소산화물의 발생원은 IPCC와 EPA보고서에 의해 배출되는 기여율이 높은 항목을 참고하여 자동차, 사업장, 발전소에 관해 산정하였다. 이외 질소수지연구는 발생원에 따라 도시지역과 농경지 및 축산업지역, 임야지역으로 구분하였으며, 질소(N)의 유입과 유출에 초점을 맞추어 시도별로 연구하였다. 질소의 유입에 대해서는 농경지의 비료에 의한 질소유입량과 생물학적 고정량, 대기침착량, 관개용수에 의한 유입량, 화학비료에 의한 질소발생량, 축산업지역에서의 사료에 의한 유입량, 임야지역의 고정 및 침착량, 도시에서 식료품 수입에 의한 질소발생량, 당 해에 생산된 농작물이 도시지역으로 유입되어 발생하는 질소량, 자동차와 발전소, 사업장에서 사용된 연료에 의한 질소발생량을 추정하였으며, 유출로는 작물에 의한 흡수량과 탈질량, 지하수로의 유출되어 발생하는 양, 가축분뇨의 해양투기, 농경지에서 흡수되는 양, 임야에서 흡수 및 탈질량, 도시에서 해양투기되는 양과 탈질량, 연료의 연소과정에서 배출되는 질소산화물을 대상으로 하였다. 질소산화물을 제외한 2011년 유입량은 1,692,648 ton/yr로 나타났으며, 유출은 1,005,496 ton/yr로 산정되었다. 질소산화물의 발생량은 자동차로 인해 308,207 ton/yr 생성되었으며, 발전소에서는 601,437 ton/yr, 사업장에서는 469,946 ton/yr이 배출된 것으로 산정되었다. 따라서 질소산화물을 포함한 2011년도 총 질소수지는 5,652,366 ton/yr 유입되었고 1,425,371 ton/yr이 유출된 것으로 산정되었다.

**주제어 :** 대한민국, 질소수지, 질소산화물, 유입 및 유출

## 1. 서론

질소(Nitrogen)는 질소고정(Nitrogen fixation), 무기화(Nitrogen mineralization), 질산화(Nitrification), 질소동화(Nitrogen assimilation), 탈질화(Denitrification)의 과정을 통하여 다양한 형태로 자연계에서 순환하고 있다.<sup>1-7)</sup> 하지만 산업화 이후의 연료 및 화학비료 사용량의 급격한 증대는 수계 내 질소축적과 더불어 대기오염이 심화되어 자연계 내 질소순환이 변화되고 있는 실정이다.<sup>8,9)</sup> 자연계 내에서의 질소거동을 파악하는 방법으로 수계에 유출되는 유량과 농도를 실측하여 산출하는 방법과 환경부의 원단위법으로 배출부하량을 산정하는 방법들을 사용하고 있다. 하지만 강우, 토지이용도, 시비시기 등에 의하여 질소배출의 편차가 증대되어 합리적인 산출방법의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 합리적인 질소유출입을 분석하기 위하여 물질수지방법이 사용되고

있으며, 이러한 물질수지방법을 통하여 배출기원 및 질소순환을 효율적으로 이해할 수 있다.

국내 질소수지연구는 주로 농업지역 혹은 단위 유역별 규모로 연구되었으며, 대한민국 전체의 질소 유입 및 유출에 대한 연구가 꾸준히 발전하고 있다. 농축산업 및 생활계, 임야를 대상으로 2001년도의 질소 유·출입 연구가 처음으로 수행되었으며,<sup>10)</sup> 2005년도의 질소수지는 연간 1,442,254 ton/yr가 유입되었고 814,415 ton/yr이 유출되었다고 산정하였다.<sup>11)</sup> 2008년도에는 비점오염원과 아산화질소에 초점을 맞춰 질소수지를 연구하여 질소로 인한 지구온난화의 영향을 정량적으로 제시하였으며,<sup>12)</sup> 2010년도에는 농업 및 축산업지역을 중심으로 시도별 질소발생량에 대한 연구를 통해 그간 대한민국의 질소수지를 비교·분석하였으며,<sup>13)</sup> 대한민국 국토의 60% 이상을 차지하는 산림을 대상으로 질소수지를 조사하여 국내의 질소가 포화상태라고 지적한 연

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

구가 있다.<sup>14)</sup>

질소산화물은 자동차와 공장, 소각로 등의 연소시설에서의 배출량이 꾸준히 증가되는 실정이다. 유럽의 경우, 도로 부문에서 발생하는 질소산화물이 전체 배출량의 40%에 육박하는 것으로 조사되었다.<sup>15)</sup> 반면 중국은 유럽과 달리 에너지 및 발전, 사업장 부문에서의 발생량이 주를 이루고 있어,<sup>16,17)</sup> 국가의 경제규모 및 현황에 따라 질소배출양상이 상이한 것으로 판단된다.<sup>18,19)</sup> 하지만 국내에서는 배출기원 및 배출량에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이고 질소산화물의 거동을 포함한 질소수지는 보고되지 않았다.

따라서 본 논문은 질소산화물을 포함한 국내의 질소수지 경향을 파악하기 위해 시·도별 질소 유출입량의 현황을 분석하여 현실적인 질소관리와 정책에 도움이 되고자 연구하였다. 더불어 배출원에 따른 질소산화물을 추정하고, 이로 인한 질소수지변화를 2010년도의 질소수지연구<sup>11-13)</sup>와 비교하여 증감추이를 분석하였다. 본 연구는 2005, 2008, 2010년 자료로 산출된 대한민국 질소수지분석의 연속 연구로서, 국내 질소수지 파악에 대하여 정부 혹은 민간차원에서 별다른 노력이 없는 상황에서, 이를 체계적으로 축적하는 연구의 일환이다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 통계 및 문헌자료

국가적인 규모의 질소수지 산정을 위하여 이전 문헌연구들과 더불어 질소수지 산정에 필요한 통계청, 환경부, 농림수산식품부, 한국농어촌공사, 국토해양부, 해양경찰청, 물환경정보시스템, 한국보건산업진흥원, 국립환경과학원, 교통안전공단, 국가교통데이터베이스, 한국전력공사, 에너지경제연구원 등의 2011년 통계 자료를 활용하였다.<sup>20-37)</sup>

남한 지역 전체와 행정구역별 질소 유입과 유출량을 결정하기 위하여 배출특성이 서로 상이한 도시지역, 농업 및 축산업지역, 임야지역으로 구분하였다. 2011년도 대한민국의 국토면적은 2010년도의 100,033,000 ha에서 다소 증가한 100,148,000 ha로 조사되었다(Table 1). 농경지가 가능한 논 면적은 2.4% 감소하여 959,914 ha로 추정되었으며, 밭은 1% 증가한 738,126 ha로 나타났다. 총 인구는 49,779,000명으로 추정되었으며, 2030년 이후부터 인구성장률은 점차 감소할 것으로 예상된다. 인천을 포함한 수도권 인구는 총 인구의 48.3%를 차지하였으며, 시도별 인구밀도는 서울과 부산에서 가장 높게 나타나 인구의 집중현상이 매우 높은 것으로 판단된다.

농축산업의 화학비료량, 퇴비량, 가축두수 및 사료량 등 질소수지에 필요한 통계자료는 관련 행정기관의 자료를 통합하였으며, 그 외 침착율, 휘산율, 탈질률 등은 문헌에 보고된 자료를 취합하여 평균값 및 중간값을 질소수지 인자값으로 사용하였으며(Table 2), 단위는 기존 연구에서 많이 사용하는 kg/ha-yr와 ton/yr로 나타내었다.

Table 1. Statistical data used in this study

	Land size of area (ha)	Paddy (ha)	Upland (ha)	Population (person)	Population density (person/km <sup>2</sup> )
Seoul	60,521	296	532	10,026	16,567
Busan	76,843	4,442	2,605	3,464	4,509
Daegu	88,368	4,345	4,582	2,477	2,803
Incheon	103,241	13,394	6,925	2,750	2,664
Gwangju	50,124	7,015	3,779	1,506	3,005
Daejeon	53,991	1,895	2,837	1,527	2,827
Ulsan	106,000	6,947	4,613	1,105	1,043
Gyeonggi	1,017,001	98,205	80,639	11,788	1,159
Gangwon	1,686,639	41,086	68,410	1,496	89
Chungbuk	743,326	49,222	66,599	1,539	207
Chungnam	862,992	165,678	66,611	2,104	244
Jeonbuk	806,723	141,036	61,719	1,802	223
Jeonnam	1,225,246	190,588	113,387	1,772	145
Gyeongbuk	1,902,956	138,427	136,204	2,638	139
Gyeongnam	1,053,316	97,305	59,687	3,232	307
Jeju	184,885	33	58,997	552	299
Whole country	10,022,172	959,914	738,126	49,778	36,230

Table 2. Nitrogen application rates in this study

Item	Application rate
Paddy field fixation	35 kg/ha/yr
Upland	15 kg/ha/yr
Forest	6.7 kg/ha/yr
Agricultural deposition	11 kg/ha/yr
Irrigation flow rate	43.84 kg/ha/yr
Denitrification of paddy and upland	51 kg/ha/yr
Denitrification of forest	5 kg/ha/yr
Protein in feed	15%
Nitrogen in protein	16%
Livestock manure of waste	27.6%
Uptake	61.7%
Volatilization of agriculture	16.0%
Leaching	2.45%

### 2.2. 질소 유입 산출

우리나라 전체의 질소수지를 산출하기 위하여 사람이 생활할 수 있는 모든 공간은 도시지역으로 가정하였으며, 농업지역은 논과 밭으로 세분화하였고, 축산업지역과 임야지역은 축산업종과 산림지역으로 구분하였다. 도시지역은 대다수 포장도로와 건물 등이 밀집된 지역으로 질소의 침착과 고정 발생하지 않는다고 가정하였다. 도시지역에 유입되는 질소는 농작물에 의한 질소 발생량과 수입 식료품으로 구분하였다. 농업지역은 질소 화학비료에 의한 토양 내 유입과 대기에서의 질소 침착량, 미생물에 의한 질소 고정량,

관계용수에 의한 발생량, 퇴비에 의한 유입량으로 추정하였다. 축산업지역에의 유입량은 국내에서 가장 많이 사육되는 젓소, 한우, 육우, 돼지, 닭, 오리, 개, 사슴 등 10개 축종으로 구분하여 총 소비된 사료량을 대상으로 산정하였으며, 임야지역은 침착량과 고정량을 유입으로 산정하였다.

### 2.3. 질소 유출 산출

농업지역에서 질소 유출은 생산된 농작물 내에 포함된 질소량과 화학비료에 의한 탈질량 및 휘발량, 임야지역에서의 탈질량과 흡수량, 지하수로 유출되는 양으로 구분하였다. 축산업지역에서는 퇴비로 재사용되는 양, 해양투기량, 가축분뇨에서의 탈질량과 휘발량으로 추정하였으며, 임야지역에서는 탈질량과 흡수량으로 산정하였다. 도시지역은 하수슬러지 발생량 및 해양투기량, 생물반응조의 탈질량 및 수계로 유출되는 하수 배출량으로 추정하였다.

### 2.4. 질소산화물량 산출

우리나라 대기오염배출량은 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 에너지수송 및 저장, 유기용제 사용, 도로 및 비도로 이동오염원, 폐기물처리, 농업 등으로 구분하여 산정되고 있다.<sup>20-22)</sup> 총 대기오염배출량 중, 질소산화물의 발생량을 추정하기 위하여 교통안전공단의 차량의 주행거리 및 실태분석을 통한 지역별, 용도별, 차종별 평균주행거리를 추정한 통계자료<sup>31,34)</sup>와 환경부에서 고시된 자동차 차종별 배출계수<sup>21,38-42)</sup>를 참고하였다. 또한, 사업장에 관해서는 환경부국립환경과학원의 사업장별 배출량 통계 자료<sup>20,21,24)</sup>를 활용하였으며, 지식경제부와 에너지관리공단의 통계자료를 이용하여 발전소에서 배출되는 질소산화물을 추정하였다.<sup>30,32)</sup>

## 3. 결과 및 고찰

2011년도 대한민국의 질소 총 유입 및 유출량은 1,692,648 ton/yr와 1,005,496 ton/yr로 산정되었으며, 2010년도 질소수지의 1,660,259 ton/yr 유입과 831,204 ton/yr이 유출된 것에 비해 다소 증가한 것으로 나타났다. 2011년도에는 새롭게 질소산화물을 포함하여 질소수지를 산정한 결과 5,652,366 ton/yr 유입되었고 1,425,371 ton/yr 유출되었으며, 질소산화물의 영향으로 유입 및 유출량이 3.3배와 1.4배 증가된 것을 확인하였다(Fig. 1). 유출에 비해 유입량이 크게 증가한 것은 국내에 화력 및 복합발전소가 주를 이루어 석탄으로 연료 화하기 때문이며, 석유화학공장과 철강, 제지, 시멘트 등의 에너지다소비 산업의 발달로 사업장에서 다량 방출된 것으로 판단된다.

### 3.1. 질소 유입

논과 밭을 포함한 농업지역에서 화학비료에 의한 질소발생량은 447,000 kg/ha-yr으로 2010년도에 423,000 ton/yr보

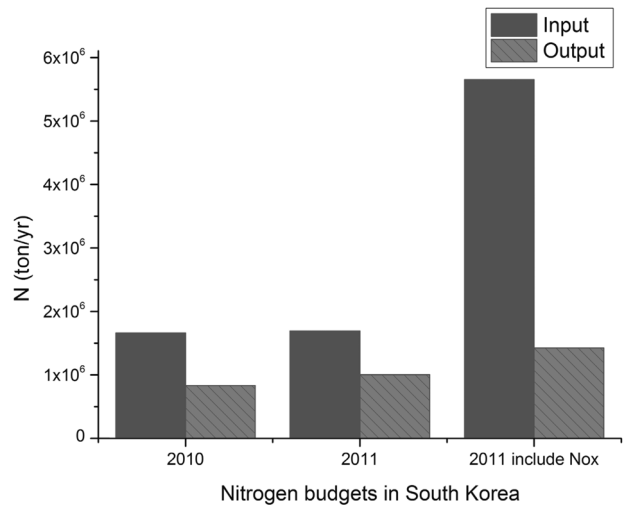


Fig. 1. Input and output of South Korea Nitrogen budget in 2010 and 2011.

다 약간 증가하였으며, 맞춤형 화학비료에 대한 정부의 지원에 따라 화학비료사용량이 점차 감소할 것으로 예상된다. 생물학적 질소 고정량은 44,669 kg/ha-yr로 산정되었으며, 대기의 침착량은 18,678 kg/ha-yr로 산출되었다. 관계용수에 의한 유입으로는 60,179 ton/yr로 산정되었으며, 퇴비에 의한 유입은 313,090 ton/yr로 나타났다(Table 3).

축산업에서 사용된 배합사료에 의한 질소유입량은 사료 내의 단백질 함량과 단백질 내 질소 함량을 적용하여 404,282 ton/yr의 질소가 축산업 지역에 유입된 것으로 추정하였다. 임야에서 침착된 질소의 양은 108,270 ton/yr로 산정하였으며, 생물학적 질소 고정량은 42,671 ton/yr로 추정되었다. 임야지역 총 질소유입량은 2,614,765 ton/yr로 산출되었으며, 이 중 발전소에서 연료형태로 유입된 질소량은 2,463,823

Table 3. Nitrogen budget in 2011 including NOx (unit : ton/yr)

	Input	Output	Input-output
City	Produced crop	Ocean disposal	76,725
		Denitrification	2,204
	Imported grocery	Drainage	44,414
	Fuel of vehicles	Sewage disposal	123,343
City		vehicles emission	93,802
	Fuel of plants	plants emission	143,027
Agriculture and livestock	Deposition	Denitrification	140,595
	Fixation	Volatilization	175,883
	Irrigation	Runoff	21,649
	Fertilization	Ocean disposal	35,550
	Compost	Produced crop	320,171
	Feedstuff	Produced crop	320,171
Forest	Deposition	Denitrification	31,844
	Fixation	Uptake	33,118
	Fuel of power plants	power plants emission	183,046
			2,366,757

ton/yr로 추정되었다. 따라서 발전소에 의해 전체 질소수지의 94%가 유입되고 있는 실정으로, 화석연료의 대체와 에너지의 고효율 시스템 개발 및 연료의 품질강화가 시급한 것으로 판단된다.

수입되는 식료품을 통하여 도시로 유입된 질소량은 158,658 ton/yr이며, 생산된 농작물의 소비로 인하여 95,152 ton/yr가 발생된 것으로 산정하였다. 또한, 자동차의 연료 및 각종 연소시설을 갖춘 사업장에서 사용된 연료로 인한 질소유입량은 87,347 ton/yr과 1,373,007 ton/yr로 나타났다.

### 3.2. 질소 유출

생산된 쌀과 보리, 채소, 과일, 콩 등의 작물에 의한 유출량 산정에는 각각의 단백질함량과 단백질 내의 질소 함량을 15%로 적용하여 320,171 ton/yr로 산정되었다. 이는 2010년 질소수지에 비하여 5.1% 늘어난 수치로, 채소와 과일 등의 소비량이 급증하여 증가된 것으로 여겨진다. 농경지에서 비료와 퇴비에 의한 휘발량은 175,883 ton/yr로 산출되었으며, 자연적 탈질과 비료에 의한 탈질량은 140,595 ton/yr로 산정되었다. 지하수로 유출되는 관개용수에 의한 질소유출량은 21,649 ton/yr로 추정되었다. 농경지에서 사용된 질소질 화학비료와 퇴비에 의한 휘발량은 175,883 ton/yr로 산정되었다. 논과 밭의 자연적 탈질과 비료에 의한 탈질량은 95,998 ton/yr과 44,597 ton/yr로 나타났다. 관개용수에 의한 질소유출량은 21,649 ton/yr로 산출되었다(Table 3).

2011년 축산분뇨의 해양투기량은 790,000 ton/yr으로 해양투기에 의한 질소 유출량은 유입량의 2%인 35,550 ton/yr로 추정되었다. 현재 육상에서의 처리를 위해 지자체별로 음폐수 처리시설을 확충하고, 가축사육두수를 제한하는 등의 노력을 기울이고 있다. 2011년 초에 구제역의 영향으로 정부에서는 가축을 대상으로 백신접종을 실시하였으며, 매몰지 실명제를 도입하는 등 지속적인 관리를 하였다. 2012년 축산분뇨를 포함한 유기성 슬러지의 해양투기 금지로 인한 처리시설 및 자원화 시설의 확충으로 인한 축산업지역에서 질소 거동 변화를 조사하기 위해서는 새로운 질소수지 산정과 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 임야지역의 질소유출은 흡수 및 탈질량으로 33,118 ton/yr와 31,844 ton/yr로 산정되었으며, 발전소에서 배출된 질소산화물은 질소로 환산하여 183,046 ton/yr로 추정되었다.

그밖에 도시지역에서는 하수슬러지의 해양투기로 76,725 ton/yr이 유출되었으며, 탈질량은 2,204 ton/yr로 산출되었다. 또한 하수처리장으로 유입된 질소 및 수계로의 유출량은 123,343 ton/yr와 44,414 ton/yr로 산정되었다. 하수처리장과 관련하여 정부에서는 하수슬러지의 발생원을 줄이는 방안을 제시하였으며, 우수관거를 개량 및 완비하는 등 하수도시설의 선진화 방안을 추진하고 있으므로 점차 감소할 것으로 예측한다. 그 밖에 자동차와 공장에서 사용된 연료로 인한 질소유출은 93,802 ton/yr와 143,027 ton/yr로 추정되었다.

### 3.3. 질소산화물 산정

질소산화물은 연료의 종류나 연소의 조건, 효율, 용도별로 배출량의 차이가 크므로 질소산화물 배출량산정을 위하여 배출계수를 적용하였다. 질소산화물은 연료의 연소과정과 배기가스에서 발생하는 형태로 대부분 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO<sub>2</sub>)로 존재한다.<sup>8,43,44)</sup> NO는 대기 중에서 대부분 산화되어 NO<sub>2</sub>로 변화되며,<sup>45,46)</sup> 질소가 다량 함유된 연료가 연소할 때 많이 배출된다.<sup>47)</sup> 질소산화물은 시멘트 및 철강 등의 공장, 소각장, 발전소 등의 산업시설에서 배출되는 점오염원과 자동차, 비행기, 철도 등의 이동오염원의 형태로 배출되는 것으로 알려져 있다.<sup>20,21,33)</sup> 현재 질소산화물과 관련된 정부의 시책은 농도 규제에서 정량의 규제로 전환중이며, 수도권 대기환경관리 기본계획의 수립으로 다량 배출되는 지역을 따로 관리하고 있다. 질소산화물을 저감 및 전환하는 기술의 개발이 이뤄지고 있어, 대기오염물질의 배출량을 산정하는 중요성이 나날이 커지고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 점오염원으로 다양한 연소시설이 포함된 사업장과 발전소에 의한 배출량을 대상으로 하였으며, 이동오염원으로는 자동차를 추정하였다.

자동차에 의한 질소산화물 배출량은 환경부에서 제시한 차종별 오염물질의 배출계수를 적용하여 산정하였다. 2011년도 집계된 자동차 등록대수는 세계에서 16위를 차지하는 18,299,750대로 조사되었으며, 지역별로는 서울과 인천, 경기도 지역에서 전체의 44.8%를 차지하는 826만5천대로 나타났다. 자동차 연료의 비중에서 99.3%를 차지하는 휘발유, 경유, LPG를 대상으로 하였으며, 일평균주행거리는 전국 평균 44.1 km를 사용하였다(Table 4).

자동차의 배출계수는 연료와 차종, 주행속도에 따라 다양하며<sup>38-42,48-51)</sup> 배출량에 큰 차이를 유발한다. 본 연구에서는 시도별 질소산화물의 배출량을 확인하고자 연료별로 제시된 배출계수를 적용하였으며, 차종별로 산정된 값보다 다소 작게 산출되었다. 따라서 기존의 배출계수에서 나아가 연료 및 차종, 차량의 연식, 주행속도를 포함한 총체적인 질소산화물 배출계수의 연구가 이뤄져야 할 것으로 판단된다.

자동차의 연료로 인한 질소유입에는 주행거리, 자동차등록대수, 연비를 이용하여 산출하였으며, 질소산화물의 배출량 산정에는 환경부에서 실측하여 고시한 제2조 제4호 차종별 배출계수를 활용하였다. 환경부 배출계수<sup>21)</sup>를 함께 적용하였을 때, 자동차 연료에 의한 질소유출량은 308,208 ton/yr로 질소유입량보다 약 2.5배 높은 값으로 추정되었다. 이는 자동차에서 배출되는 질소산화물의 60%인 185,322 ton/yr가 연소과정에서 공기 중의 질소와 산소가 결합하여 생성되어 NO<sub>x</sub>형태로 배출되는 것으로 추정되며, 이를 저감하기 위해서는 평균 화염온도를 낮추고 연료의 품질을 개선하는 노력이 필요할 것으로 판단된다(Table 4).

사업장에서 배출되는 질소산화물은 국립환경과학원의 대기오염물질 통계자료에서 에너지산업과 비산업, 제조업 부문의 연소, 생산공정, 폐기물처리부문을 활용하여 추정하였다.<sup>20,21)</sup> 자동차와 석유화학, 조선 등의 중화학공업으로

**Table 4.** Fuel consumptions and NOx emissions by vehicles

	Vehicle registration			Mileage per day	Nitrogen content by fuel (ton/yr)			NOx emission (ton)		
	Gasoline	Diesel	LPG		Gasoline	Diesel	LPG	Gasoline	Diesel	LPG
Seoul	1,479,867	1,083,846	393,043	41.5	6,839	11,897	681	14,795	33,492	1,488
Busan	576,111	421,941	153,011	45.7	2,932	4,631	265	5,760	13,038	579
Daegu	489,718	358,667	130,066	44.2	2,411	3,937	225	4,896	11,083	493
Incheon	488,803	357,997	129,823	42.8	2,330	3,930	225	4,887	11,062	492
Gwangju	266,299	195,036	70,727	44.8	1,329	2,141	123	2,662	6,027	268
Daejeon	290,464	212,734	77,145	42.2	1,365	2,335	134	2,904	6,574	292
Ulsan	226,657	166,003	60,199	41.1	1,037	1,822	104	2,266	5,130	228
Gyeonggi	2,138,976	1,566,574	568,098	46.1	10,981	17,195	985	21,384	48,409	2,151
Gangwon	308,370	225,849	81,901	41.9	1,439	2,479	142	3,083	6,979	310
Chungbuk	318,231	233,070	84,520	45.0	1,595	2,558	146	3,181	7,202	320
Chungnam	431,738	316,202	114,667	44.9	2,159	3,471	199	4,316	9,771	434
Jeonbuk	366,139	268,158	97,244	44.1	1,798	2,943	169	3,660	8,286	368
Jeonnam	368,229	269,689	97,799	45.7	1,874	2,960	169	3,681	8,334	370
Gyeongbuk	567,940	415,956	150,841	43.4	2,745	4,566	261	5,678	12,853	571
Gyeongnam	718,026	525,878	190,703	45.6	3,646	5,772	331	7,178	16,250	722
Jeju	127,806	93,604	33,944	40.7	579	1,027	59	1,278	2,892	129
Whole country	9,163,374	6,711,204	2,433,733	44.1	45,003	73,665	4,218	91,609	207,382	9,216

인해 대형 산업단지가 밀집된 경기도와 경상남도, 전라남도, 울산지역에서 질소유입이 크게 나타났으며, 질소의 유출은 사업장의 규모와 면적대비 대규모 연소시설이 위치하고 있는 충청남도와 강원도에서 많이 배출된 것으로 나타났다.<sup>52)</sup>

국내의 발전소는 화력, 복합, 원자력이 주를 이루고 있으며, 증기터빈을 이용하는 화력발전소의 발전설비가 29,571 MW로 전체 발전량의 35%를 차지하고 있다. 2011년도의

발전량은 화력에서 211,205 Gwh 원자력에서 154,723 Gwh 복합에서 101,479 Gwh로 조사되었다. 생산된 총 전력은 455,070 Gwh으로 제조업, 수도 및 전철, 전기사업자가 속해 있는 서비스업, 가정용으로 판매되었다. 발전소에서 사용된 연료는 유연탄 79,854,000 ton과 LNG 13,607,000 ton이 가장 많이 사용된 것으로 조사되었다. 2011년 연료로 인한 질소유입량은 2,463,823 ton/yr로 나타났으며, 질소산화물 발생량은 601,437 ton/yr로 산정되었다(Table 6).

**Table 5.** NOx emissions from fuel use in power plants

	Nitrogen content by fuel (ton/yr)				Emission of NOx (ton/yr)			
	Coal	Heavy oil	Diesel	LNG	Coal	Heavy oil	Diesel	LNG
Seoul	-	-	-	322.2	-	-	-	1.9
Busan	-	-	0.1	1,498.5	-	-	0.1	9.1
Daegu	-	-	-	-	-	-	-	-
Incheon	323,033.2	-	218.0	6,528.0	77,097.3	-	114.5	39.4
Gwangju	-	-	-	-	-	-	-	-
Daejeon	-	-	-	-	-	-	-	-
Ulsan	-	1,062.2	3.8	952.5	-	1,085.1	2.0	5.8
Gyeonggi	-	5,180.3	10.4	2,563.3	-	5,291.9	5.4	15.5
Gangwon	80,426.3	4.2	17.2	528.1	19,195.1	4.3	9.0	3.2
Chungbuk	-	-	-	-	-	-	-	-
Chungnam	1,192,553.6	321.1	163.0	1,781.0	284,622.8	328.0	85.5	10.8
Jeonbuk	-	-	23.7	712.6	-	-	12.4	4.3
Jeonnam	86,919.8	13.8	120.3	425.7	20,744.9	14.1	63.1	2.6
Gyeongbuk	-	-	102.8	-	-	-	54.0	-
Gyeongnam	743,207.5	10,607.9	112.7	-	177,378.9	10,836.4	59.2	-
Jeju	-	4,079.3	330.8	-	-	4,167.2	173.7	-
Whole country	2,426,140.4	21,268.8	1,102.8	15,311.9	579,038.8	21,726.9	579.0	92.5

Table 6. Nitrogen budget by regions of South Korea including NOx

	Input			Output		
	Agriculture and livestock	City	Forest	Agriculture and livestock	City	Forest
Seoul	333	39,317	837	179	82,124	1,671
Busan	2,834	30,404	1,907	1,527	63,508	3,804
Daegu	3,601	27,212	2,609	1,940	56,841	5,206
Incheon	9,021	36,093	2,154	4,860	75,391	4,298
Gwangju	8,093	9,226	1,048	4,360	19,272	2,091
Daejeon	1,994	16,858	1,608	1,074	35,214	3,208
Ulsan	5,091	21,831	3,672	2,743	45,599	7,326
Gyeonggi	104,071	206,595	28,076	56,068	431,534	56,020
Gangwon	48,337	176,849	72,914	26,041	369,401	145,484
Chungbuk	69,068	67,651	26,415	37,210	141,308	52,706
Chungnam	158,493	27,515	23,328	85,387	57,474	46,545
Jeonbuk	131,878	28,669	23,789	71,049	59,883	47,466
Jeonnam	164,480	108,361	37,016	88,613	226,344	73,858
Gyeongbuk	130,694	210,081	71,541	70,411	438,816	142,744
Gyeongnam	75,199	52,943	42,994	40,513	110,586	85,786
Jeju	27,035	25,698	4,735	14,565	53,679	9,448
Whole country	1,287,898	490,638	333,988	693,848	1,024,840	666,399

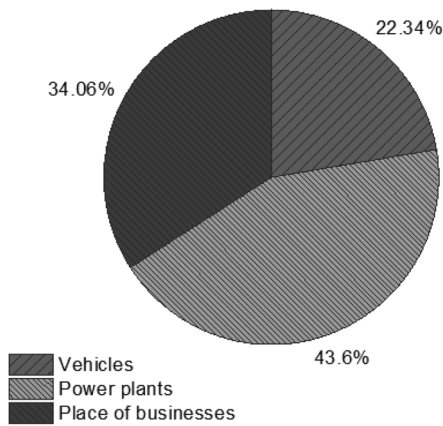


Fig. 2. NOx emissions of South Korea in 2011.

질소산화물의 총 배출량에서 자동차로 인한 발생량이 등록된 자동차의 수에 비해 비교적 적은 22%로 나타났으며, 타국가에 비해 짧은 평균이동거리에 의한 영향이라고 판단된다. 국내의 발전소 중 과반수를 차지하는 화력발전소로 인해 발생한 질소산화물이 다소 많이 측정되어 44%를 차지하였으며, 각종 공장과 다양한 연소시설이 포함된 사업장에서의 배출은 34%로 산출되었다(Fig. 2).

### 3.4. 시도별 질소수지

본 연구에서는 배출원에 따른 질소수지를 시도별로 구분하여, 행정구역 단위의 질소 관리 및 정책에 도움이 되고자 하였다. 기존 질소수지는 배출원의 특성에 따라 농경지 및

축산업 지역, 임야, 도시지역으로 구분하였는데, 질소는 배출 특성에 따라 시도별로 편차가 크므로 질소의 관리 정책에 있어서 시도별로 구분하는 것이 더 효율적이라 판단한다.

질소산화물에 대해 도시부문에는 자동차와 사업장으로 구분하였으며, 임야에는 발전소를 추가하였다. 이는 자동차가 산업과 인구가 밀집된 지역에서 많은 등록대수를 보이며, 사업장은 근로자와 소비자 사이에서 비교적 가까운 곳에 위치한다는 도시의 특징을 반영한 것이다. 또한 국내의 발전소는 일반적으로 해안가 근처에 위치하며, 면·리와 같은 지방 행정구역의 말단에 건설되었으므로 임야로 구분하였으며, 새롭게 추가한 질소산화물의 산정에는 연료 내의 질소함량을 유입량으로 포함하였고, 연소로 인한 질소산화물 배출량을 유출량으로 산출하였다.

질소산화물을 포함한 질소수지의 총 유입 및 유출량은 5,652,366 ton/yr, 1,425,371 ton/yr로 조사되었다(Fig. 3). 자동차에서 배출된 질소산화물은 경기도와 서울에서 가장 많은 71,944 ton/yr과 49,775 ton/yr로 나타났으며, 인구가 면적이 적은 제주도에 4,299 ton/yr가 발생한 것으로 나타났다. 충청남도에서는 대규모의 발전소로 인해 1,194,819 ton/yr의 질소산화물이 배출되었으며, 대구와 광주, 대전, 충청북도에서는 연소공정을 갖춘 발전소가 없으므로 발전소 부문

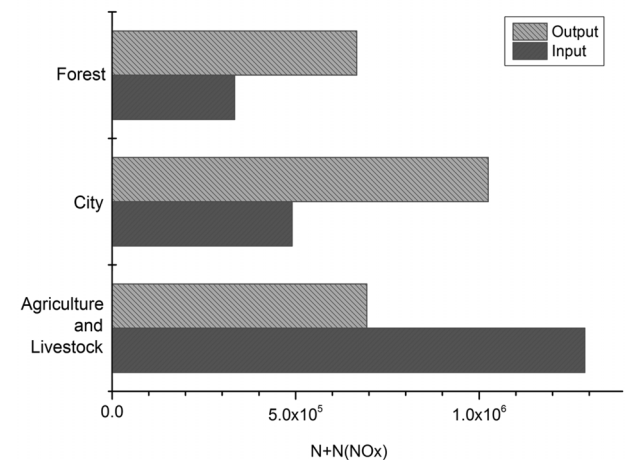
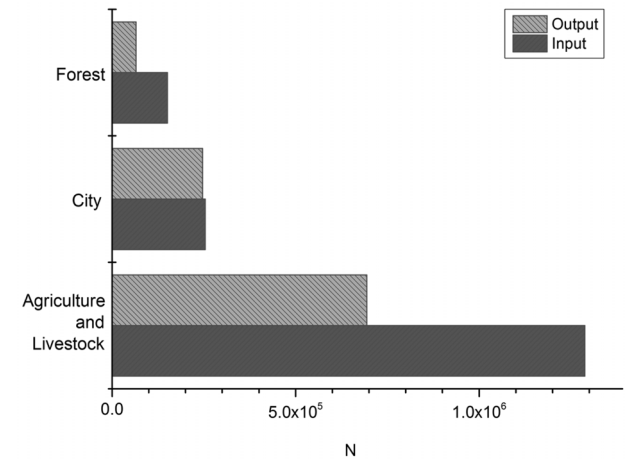


Fig. 3. Nitrogen balance including NOx.

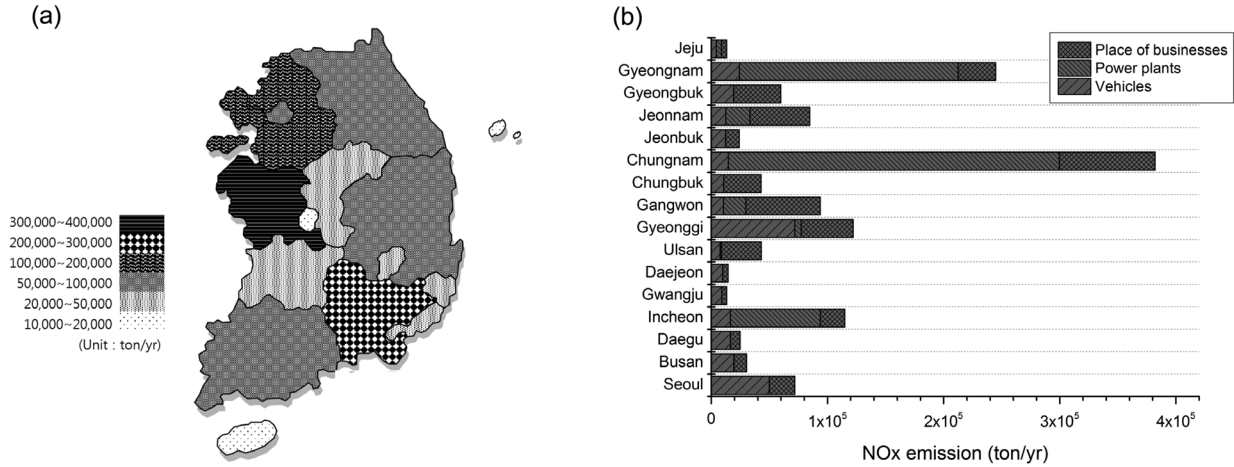


Fig. 4. NOx emissions by region: (a) NOx budget map and (b) emission sources of NOx.

에서의 질소산화물은 배출되지 않았다. 시멘트공장과 석유화학공장이 크게 위치한 충청남도, 경기도, 강원도에서 사업장에 의한 질소산화물 배출량 중 40%를 차지하는 191,600 ton/yr로 추정되었다.

2011년도 질소수지는 연료에 함유된 질소의 유입과 질소산화물 형태의 유출로 인해 각각 70%와 29%가 증가되어 질소산화물을 포함한 질소관리가 시급한 것으로 판단된다. 또한, 질소산화물 저감을 위하여 인구밀도가 높은 수도권과 대형 발전소가 위치한 지역을 중점적으로 대중교통 활성화 및 자동차 공회전 금지, 연료의 품질규제, 대기오염물질 정량 규제와 같은 질소산화물 배출량 규제 및 강화가 이뤄져야 할 것으로 판단된다(Table 6, Fig. 4).

국내의 질소수지는 국가의 정책에 의해 매년 변화하며, 증가하는 양상을 보인다. 2010년도에는 1,660,259 ton/yr가 유입되었고 831,204 ton/yr 유출된 것으로 산출되었으며, 이듬해인 2011년도 산정에서 질소산화물을 추가 연구한 결과 우리나라로 유입된 총 질소량은 5,652,366 ton/yr이었으며, 총 유출량은 1,425,371 ton/yr로 조사되었다. 따라서 질소의 유입 및 유출에 관한 불확실성을 줄여나가기 위해 국가적인

질소수지의 연구는 꾸준히 진행되어야 하며, 이를 토대로 질소에 관한 정부의 정책 강화가 요구된다(Fig. 5).

#### 4. 결론

본 연구는 2010년 질소 유출입 수치에서 나아가 질소산화물을 포함하여 2011년 질소수지를 산정하고자 하였다. 우리나라로 유입된 총 질소량은 5,652,366 ton/yr이었으며, 총 유출량은 1,425,371 ton/yr로 조사되었다. 이 중 연료의 사용으로 인한 질소의 유입과 질소산화물로의 유출은 70%와 29%를 차지하고 있어 질소산화물을 포함한 질소관리가 시급한 것으로 판단된다. 토지이용에 따른 질소 유출입수치를 살펴보면, 농업 및 축산업지역에서의 질소유입과 유출은 1,287,898 ton/yr와 693,848 ton/yr으로 질소비료에 의한 유입량이 35%로 여전히 높은 것으로 판단된다. 임야지역에서 유입된 질소는 150,942 ton/yr이며, 64,962 ton/yr는 자연적 유출량으로 추정된다. 도시지역에서는 식품의 수입으로 253,808 ton/yr가 유입되며, 슬러지 및 수계로 직접 유출된 질소는 246,686 ton/yr로 조사되었다.

2011년도 질소산화물을 포함하지 않은 질소수지는 2010년도에 비해 다소 증가하여 32,389 ton/yr가 유입되었으며, 174,292 ton/yr가 유출된 것으로 나타났다. 인구와 밭 면적, 축산분뇨, 생산된 농작물의 증가로 인해 질소유입량이 늘어났으며, 도시지역에서의 하수처리장과 수계로 유출되는 비점오염원을 추가하여 167,757 ton/yr가 증가한 것으로 사료된다.

우리나라의 질소산화물 유입과 유출은 자동차, 산업시설을 포함한 사업장, 발전시설로 구분하여 추정하였다. 자동차의 연료소비로 인한 질소산화물 배출량은 308,208 ton/yr로 질소산화물 배출량의 22.3%를 차지하는 것으로 조사되었다. 사업장 및 발전소에서 배출된 질소산화물은 469,946 ton/yr와 601,437 ton/yr로 산정되었다. 대기 중으로 질소산화물의 배출을 저감시키기 위해서는 적절한 연소온도 및 공연비 유지가 필요할 것으로 판단되며, 지역별 배출양상을 파악하여 배출

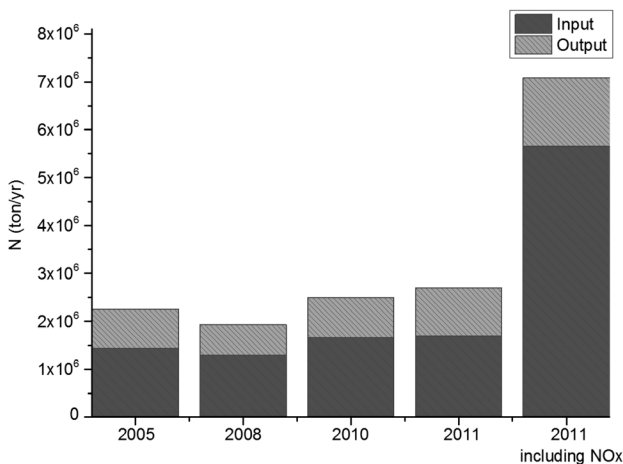


Fig. 5. Change of Nitrogen budget in South Korea.

특성별 질소관리대책을 수립하여야 할 것으로 사료된다.

질소수지는 맞춤형 화학비료, 해양투기 전면금지, 사료값 안정화 등 정부의 시책과 직결되어 변화되며, 질소수지의 증감은 각 배출원의 기작과 국내 질소의 거동에 영향을 미친다. 또한 질소순환의 교란은 생물학적 영양 공급을 증대하여 탄소의 순환과 큰 연관성이 있으므로, 꾸준한 연구를 통해 질소수지의 불확실성을 줄이는 노력을 기울여야 할 것이며, 시·도별 배출양상에 따라 별도의 관리가 필요할 것으로 판단된다.

## 사사

이 논문은 2013년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

KSEE

## Reference

- Aneja, V. P., Schlesinger, W. H., Erisman, J. W., Behera, S. N. Sharma, M. and Battye W., "Reactive nitrogen emissions from crop and livestock farming in India," *Atmos. Environ.*, **47**, 92~103(2012).
- Mosier, A. R., "Environmental challenges associated with needed increases in global nitrogen fixation," *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **63**(2), 101-116(2002).
- Rosswall, T. and Paustian, K., "Cycling of nitrogen in modern agricultural systems," *Plant Soil*, **76**(1), 3~21(1984).
- Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S. and Van Cleemput, O., "Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle," *Nutr. cycl. Agroecosyst.*, **52**(2), 225-248(1998).
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J. and Kuhlmann, H., "Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector," *Int. J. Life Cycle Assoc.*, **5**(6), 349-357(2000).
- Canfield, D. E., Glazer, A. N. and Falkowski, P. G., "The evolution and future of Earth's nitrogen cycle," *Science*, **330** (6001), 192-196(2010).
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A. and Schindler, D. W., "Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences," *Ecol. Appl.*, **7**(3), 737-750(1997).
- Yu'e, L. and Erda, L., "Emissions of N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> from fuel combustion, industrial processes and the agricultural sectors in China," *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **57**(1), 99-106(2000).
- Small, K. A. and Kazimi, C., "On the costs of air pollution from motor vehicles," *J. Trans. Economics Policy*, pp. 7~32 (1995).
- Choi, E. and Kim, T., "Estimated Nitrogen Discharge by a mass balance approach," *J. Environ. Policy*, **3**(1), 95~117(2004).
- Yun, D. M., Park, S. H. and Park, J. W., "Nitrogen budgets of South Korea in 2005," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **30** (1), 97~105(2008).
- Nam, Y. H., An, S. W. and Park, J. W., "Nitrogen budgets of south korea in 2008: Evaluation of non-point source pollution and N<sub>2</sub>O," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(2), 103-112 (2011).
- Nam, Y. H., An, S. W., Jung, M. S. and Park, J. W., "Nitrogen budgets of agriculture and livestock in South Korea at 2010," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **34**(3), 204-213(2012).
- Kim, J. H., "Atmospheric acid deposition: Nitrogen saturation of forests," *J. Ecol. Field Biol.*, **29**(3), 305-321(2006).
- Vestreng, V., Ntziachristos, L., Semb, A., Reis, S., Isaksen, I. and Tarrasón, L., "Evolution of NO<sub>x</sub> emissions in Europe with focus on road transport control measures," *Atmos. Chem. Phys.*, **9**(4), 1503-1520(2009).
- Fu, L., Hao, J., He, D., He, K. and Li, P., "Assessment of vehicular pollution in China," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **51**(5), 658-668(2001).
- Hao, J., Tian, H. and Lu, Y., "Emission inventories of NO<sub>x</sub> from commercial energy consumption in China, 1995-1998," *Environ Sci Technol.*, **36**(4), 552-560(2002).
- Holland, E. A. Dentener, F. J., Braswell, B. H., Sulzman, J. M., "Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets," *Biogeochem.*, **46**(1-3), 7~43(1999).
- Misselbrook, T. H., Cape, J. N., Cardenas, L. M., Chadwick, D. R., Dragosits, U. and Hobbs, P. J., et al., "Key unknowns in estimating atmospheric emissions from UK land management," *Atmos. Environ.*, **45**(5), 1067-1074(2011).
- Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research, "National air pollutants emission 2010," National Institute of Environmental Research(2012).
- Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research, Korea Environment Corporation, "air pollutants emitting facility," National Institute of Environmental Research (2013).
- Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research, "A Co-Study in the Estimation of Criteria Pollutants Emission Factors from Stacks," National Institute of Environmental Research(2002).
- Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, "Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Statistical Yearbook 2011," Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries(2012).
- Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research, "The Air Pollutants Emission Factor from discharge facility," Ministry of Environment(2004).
- Korea Coast Guard, "Korea Coast Guard 2011 White Paper," Korea Coast Guard(2011).
- Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, <http://www.rdago.kr/>(2013).
- Statistics Korea, <http://www.index.go.kr/>(2013).
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, [www.molit.go.kr/](http://www.molit.go.kr/)(2013).
- Environment Information System, <http://water.nier.go.kr/>(2013).



30. Korea Energy Management Corporation, <http://www.kemco.or.kr/>(2013).
31. The Korea Transport institution, <http://www.ktdb.go.kr/ko/web/guest/home>(2013).
32. Korea Electric Power Corporation, "Statistics of Electric Power in Korea 2011," Korea Electric Power Corporation(2012).
33. National Institute of Environmental Research, <http://airemiss.nier.go.kr/main.jsp>(2013).
34. Korea Transportation Safety Authority, <http://www.ts2020.kr/>(2013).
35. Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research, "Environmental Statistics Yearbook 2011," Ministry of Environment(2012).
36. Korea Rural Community Corporation, [www.ekr.or.kr/](http://www.ekr.or.kr/)(2013).
37. Statistics Korea, <http://kostat.go.kr/>(2013).
38. Ministry of Environment, "A Study on the National Emission Inventory for Air Pollutant by Transportation Type (II); The Calculation of Pollutant Emission Factors for LPG Vehicles," Ministry of Environment(2009).
39. Ministry of Environment, "A Study on the Calculation of Pollutant Emission Factors for Vehicles(II); Calculation of Pollutant Emission Factors for Diesel Trucks," Ministry of Environment(2004).
40. Ministry of Environment, "A Study on the Calculation of Pollutant Emission Factors for Vehicles(III); Calculation of Pollutant Emission Factors for Light-Duty Vehicles," Ministry of Environment(2005).
41. Ministry of Environment, "A Study on the Calculation of Pollutant Emission Factors for Vehicles(IV); Calculation of Pollutant Emission Factors for Passenger Cars," Ministry of Environment(2006).
42. Ministry of Environment, "A Study on the Calculation of Pollutant Emission Factors for Vehicles(I); Calculation of Pollutant Emission Factors for Medium and Heavy-duty Buses," Ministry of Environment(2003).
43. Agarwal, A. K., "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **33**(3), 233-271(2007).
44. Bowman, C. T., "Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: technology driven by regulation," Symposium (International) on Combustion, Elsevier(1992).
45. Mattigod, S., Rai, D., Eary, L., Ainsworth, C., "Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I. Review of the major elements," *J. Environ. Qual.*, **19**(2), 188-201(1990).
46. Logan, J. A., "Nitrogen oxides in the troposphere: Global and regional budgets," *J. Geophys. Res.*, **88**(C15), 10785-10807(1983).
47. Eyzat, P. and Guibet, J., "A new look at nitrogen oxides formation in internal combustion engines," *Training*, **2013**, 11 (1968).
48. Tang, U. W. and Wang, Z., "Determining gaseous emission factors and driver's particle exposures during traffic congestion by vehicle-following measurement techniques," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **56**(11), 1532-1539(2006).
49. McGaughey, G. R., Desai, N. R., Allen, D. T., Seila, R. L., Lonneman, W. A. and Fraser, M. P., et al., "Analysis of motor vehicle emissions in a Houston tunnel during the Texas Air Quality Study 2000," *Atmos. Environ.*, **38**(20), 3363-3372(2004).
50. Nansai, K., Moriguchi, Y. and Tohno, S., "Compilation and application of Japanese inventories for energy consumption and air pollutant emissions using input-output tables," *Environ. Sci. Technol.*, **37**(9), 2005-2015(2003).
51. Nansai, K., Moriguchi, Y. and Tohno, S., "Compilation and application of Japanese inventories for energy consumption and air pollutant emissions using input-output tables," *Environ. Sci. Technol.*, **37**(9), 2005-2015(2003).
52. Korea Industrial Complex Corporation, <http://www.kicox.or.kr/>(2013).