

서울시 에너지부문 직·간접 온실가스-대기오염 통합 배출량(2010) 산정

An Estimation of Direct and Indirect GHG-AP Integrated Emissions from Energy Sector in Seoul (2010)

정재형·권오열^{1)*}

서울과학기술대학교 에너지환경공학과, ¹⁾서울과학기술대학교 환경공학과
(2014년 1월 26일 접수, 2014년 2월 25일 수정, 2014년 4월 12일 채택)

Jaehyung Jung and O-yul Kwon^{1)*}

*Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of
Science and Technology*

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Seoul National University of
Science and Technology*

(Received 26 January 2014, revised 25 February 2014, accepted 12 April 2014)

Abstract

Greenhouse gas (GHG) and Air Pollution (AP) emission inventories have been constructed and estimated independently up-to-date in Seoul. It causes difficulty in GHG and AP integrated management due to a difference in emission inventories. In this study, we constructed GHG and AP integrated emission inventories for direct and indirect sources in Seoul during the year 2010 in Energy activities for estimating GHG and AP emissions were derived from IPCC guideline, guidelines for local government greenhouse inventories, air pollutants calculation manual, and Indirect Emission Factors (IEF) reported by Korea Power Exchange. The annual GHG emission was estimated as 50,530,566 tonCO_{2eq}, of which 54.8% resulted from direct sources and the remaining 45.2% from indirect sources. Among direct sources, transportation sector emitted the largest GHG, accounting for 47.3% of the total emission from direct sources. As with indirect sources, purchased electricity sector only emitted 98.6% of the total emission from indirect sources. The annual AP emission was estimated as 283,701 tonAP, of which 85.9% was contributed by the combined AP emissions of transportation and fugitive sectors. Estimation of individual air pollutant showed that the largest source were transportation sector for CO, NO_x, TSP, PM₁₀ and NH₃, non-energy sector for SO_x, and fugitive sector for VOCs. This study found some limitations in estimating GHG and AP integrated emissions, such as nonconforming emission inventories between GHG and AP, and no indirect AP emission factor of purchased electricity, and so on. Those should be further studied and improved for more effective GHG and AP integrated management.

Key words : Emission inventory, GHG (Greenhouse Gas), AP (Air Pollution), Direct sources, Indirect sources

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-970-6616, E-mail : oykwon@seoultech.ac.kr

1. 서론

급격한 경제 성장과 도시화는 지구온난화 및 대기의 질 저하와 같은 환경 문제를 발생시켰다. IPCC (2013) RCP 8.5 시나리오에 따르면 지난 133년간 (1880~2012) 세계 평균 기온은 0.85°C 상승하였으며, 현재 온실가스 추세가 계속될 경우 21세기말 대기 온도는 평균 3.7°C, 해수면은 평균 63 cm 상승할 것 이라고 전망하고 있다. 우리나라는 지난 100년간 (1908~2007) 1.5°C, 서울시는 2.4°C 상승하였으며, 최근 5년간 서울시 연평균 강수량은 1,643 mm (2007~2011)로 지난 100년간 1,330 mm에 비하여 급격히 상승하였다 (Seoul City, 2013; Korea Meteorological Administration, 2011).

서울시는 한반도의 수도로 정치, 경제, 문화 등의 중심지인 동시에 에너지 집약형 소비 주체의 도시이다. 국제에너지기구 IEA (2012)에 의하면 우리나라는 2010년 기준 세계 10위에 해당하는 에너지를 소비하고 있으며, 서울시의 에너지 소비량은 지속적인 증가를 보이고 있다 (Seoul City, 2011). 2010년 우리나라 총 에너지 소비량은 193,832 천toe이며, 서울시는 15,717 천toe로 전체 사용량의 8.1%를 소비한 것으로 나타났다 (Korea Energy Economics Institute, 2011). 이는 2009 (15,027 천toe)년 대비 4.4% 증가한 수치이며, 용도별 비율을 살펴보면 가정 및 상업이 58%, 수송이 31%로 전체의 89%를 차지하며, 에너지원별로는 석유 37%, 도시가스 33%, 전력 25%로 전체 에너지의 95% 이상을 차지하는 것으로 나타났다 (Seoul City, 2011; Korea Energy Economics Institute, 2011).

현재 서울시는 6개 분야(신재생에너지 생산 확대, 건물부분 에너지 효율화, 친환경 고효율 수송시스템 구축, 에너지산업 일자리 창출, 에너지 저소비형 도시 공간구조로 개편, 에너지 저소비 실천 시민문화 창출) 77개 에너지 정책 사업을 추진하고 있다 (Seoul City, 2013). 이와 더불어 서울시는 IPCC (2006) 가이드라인 및 정부에서 개발한 대기오염물질 산정방법론에 따라 매년 온실가스와 대기오염물질 발생량을 산정하고 있지만, 온실가스와 대기오염물질 산정은 단독 배출목록 체계로 구성되어 있어 상호 보완적인 산정이 이루어지지 않아 온실가스-대기오염 통합 환경 관리가 어려운 실정이다. 예를 들면, 국가온실가스

배출량 산정은 2010년 6월 15일에 출범한 온실가스 종합정보센터에 의해 이루어지고 있으며 (GIR, 2014), 대기오염배출량 산정은 국립환경과학원 대기오염물질 배출량에 의해 운영되고 있다 (NIER, 2014). 이는 온실가스와 대기오염 배출량 산정 연구가 개별적으로 진행되고 있지만 현재까지 통합관리는 되지 않고 있음을 나타낸다. 또한 IPCC (2006) 가이드라인에 의하면 전력과 같은 온실가스 간접배출은 중복산정과 같은 문제로 산정에서 제외가 되어 있다.

이에 본 연구는 두 가지 측면에서 기존의 산정 방식과 다르게 산정을 하였다. 첫째로, 열병합발전 및 자원회수시설과 같이 행정구역상 서울시 내에서 운영되고 전력 및 스팀(열)을 생산하는 에너지 생산시설에 대해서는 직접발생원 (direct source, scope 1)으로 산정하였다. 둘째로, 서울시에서 사용하는 신재생 에너지는 태양열, 태양광, 바이오에너지, 풍력, 연료전지, 폐기물, 지열 총 7분야로, 이 중에서 바이오에너지와 폐기물은 소각에 의해 전력과 열을 생산하는 시설이다. 따라서 바이오에너지와 폐기물 에너지부문은 scope 1으로 산정하며, 이 외의 신재생에너지는 간접 발생원 (direct source, scope 2)으로 산정하였다. 이는 기존의 서울시 에너지 사용량 분석과 온실가스 배출량 산정 및 분석 방식 그리고 국내 에너지 사용량에 따른 지자체별 직접 및 간접 온실가스 산정보다 세부적인 운영경제설정이다 (Lee et al., 2012; Kim et al., 2012a; Kim et al., 2011). 또한 온실가스-대기오염 통합 관리를 위한 연구와 온실가스-대기오염 통합 배출량 산정의 고도화 및 감축 측면에서도 중요하다 (Song et al., 2011).

따라서 본 연구는 서울시를 대상으로 에너지 부문 소비되는 에너지 사용량을 조사하고, 이에 따른 서울시 온실가스-대기오염 통합 배출원 목록작성과 직·간접 온실가스-대기오염 통합 인벤토리를 구축하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구의 범위

본 연구의 공간적 범위는 서울시이며, 시간적 범위는 2010년으로 하였다. 에너지활동도는 최종에너지 사용량을 기준으로 국가 에너지 통계자료를 이용하

Table 1. Urban characteristic information and energy activities of Seoul.

Level	Specific sector	Unit	Value
City size	Gross area	Km ²	605.25
	Total population	Person	10,575,447
	Population density	Per/km ²	17,473
	Households	House	4,224,181
	Person per households	Person/house	2.44
Energy	Coal		117
	Petroleum		5,800
	City gas	1,000 toe	5,127
	Thermal energy		510
	New/renewable energy		97
	Electricity		4,067
	Water supply	1,000 m ³	1,120,291

여 자료를 수집 및 구축하는 하향식 접근법 (Top-Down Approach, TDA)을 이용하여 자료를 구축하였다. 표 1은 연구대상 지역의 특징과 에너지원별 활동도를 나타낸 것이며, 2010년 기준 서울시 면적은 605.25 km², 인구는 10,575,447명이다 (Korea Energy Economics Institute, 2011; Seoul City, 2011).

운영경계설정은 직접배출원 (scope 1), 간접배출원 (scope 2), 기타배출원 (scope 3)으로 구분할 수 있으며, scope 1은 연료연소 등에 의해 직접적으로 배출되는 배출원, scope 2는 직접배출원이 아닌 전력 등의 사용에 의해 간접적으로 배출되는 배출원, scope 3는 scope 1과 scope 2를 제외한 이외의 배출되는 배출원을 의미한다. 앞서 설명한 운영경계를 근거로 scope 1은 고정연소(에너지 산업 및 지역난방시설), 이동연소, 탈루배출 그리고 신재생에너지(바이오에너지, 폐기물)로 구분하였으며, scope 2는 구매전력, 구매상수도 그리고 신재생에너지(태양광, 태양열, 연료전지, 풍력, 지열)로 구분하였다. 본 연구는 에너지 활동도를 기준으로 온실가스-대기오염 통합 배출량을 산정하기 때문에 scope 3는 산정에서 제외하였다.

연구의 내용적 범위는 서울시 에너지 소비구조의 분석을 토대로 온실가스-대기오염 통합 배출목록 작성하고, 부문별 발생하는 직·간접 온실가스-대기오염 통합 산정 시스템을 데이터베이스화하여 서울시 온실가스-대기오염 통합 인벤토리를 구축함이다.

2.2 배출원별 직·간접 통합 배출량 산정방법

배출량 산정방법은 IPCC (2006) 가이드라인과 지자체온실가스 배출량 산정지침 그리고 대기오염물질

산정방법편람 및 전력거래소에서 제공하는 전력 간접배출계수 (Indirect Emission Factor, IEF)를 기반으로 산정하였다 (Korea Power Exchange, 2012; Korea Environment Corporation, 2012; NIER, 2010; IPCC, 2006). 표 2에 온실가스-대기오염 통합 배출량 산정식과 산정방법을 정리하였다.

배출원별 온실가스-대기오염 통합 배출량의 자세한 산정방법은 다음과 같다. 고정연소부문은 통계자료를 이용하여 활동도를 추출하였으며, 온실가스 산정방법은 tier-2 수준을 적용하되, 국내배출계수가 부재한 경우에는 IPCC에서 제공하는 기본계수 (tier-1)를 적용하였다. 그리고 대기오염물질은 국내에서 개발한 배출계수를 적용하였다. 또한 지역난방시설은 수집 및 추출된 전력 및 열 사용량에 대하여 간접배출계수를 적용하여 tier-2 수준으로 온실가스 배출량을 산정하였다. 이동연소는 도로이동연소와 비도로이동연소로 구분하였으며, 2011년에 교통안전공단에서 발행한 2010년도 자동차 주행거리 실태분석 연구 및 서울시 통계연보 등을 바탕으로 차량주행거리 (Vehicle Kilometer Traveled, VKT)를 적용하여 tier-3 수준으로 온실가스와 대기오염물질 배출량을 산정하였다 (Kim *et al.*, 2012b; Korea Transportation Safety Authority, 2011). 항공기는 연료사용량을 이용하는 tier-1과 tier-2 방법론 대신 tier-3 수준의 기종별 이착륙횟수 (Land/Take-Off Cycles, LTO)와 지상부대장비 (Ground Support Equipment, GSE) 운영시간을 이용하여 온실가스-대기오염 통합 배출량을 산정하였으며, 온실가스부문 지상부대장비는 활동도가 부재하여 산정에서 제외하였다 (Shon *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2012). 그리

Table 2. Methods and equations of GHG-AP emissions estimation in energy sector.

Source	GHG (Greenhouse Gas)			AP (Air Pollution)		
	Sector	Method	Equation	Equation	Method	Sector
Scope 1	Energy industry/ Manufacturing	Tier-1/2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i) \times (1 - R_i)$	Tier-2	Public generation/District heating/Manufacturing
	Aircraft	Tier-3	$E_{LTO} = \sum_{LTO} (No_{LTO} \times EF_{LTO})$	$E_{LTO} = \sum_{LTO} (No_{LTO} \times EF_{LTO})$	Tier-3	Aircraft
	Vehicle	Tier-3	$E_{i,j,k} = \sum_{i,j,k} (VKT_{i,j,k} \times EF_{i,j,k} \times Vehicle_{i,j,k})$	$E_{i,j,k} = \sum_{i,j,k} (VKT_{i,j,k} \times EF_{i,j,k} \times Vehicle_{i,j,k})$	Tier-3	Vehicle
	Railroad	Tier-1/2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	Tier-1/2	Railroad
	Construction/Agriculture	Tier-1/2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	$E_i = \sum_i (Ownership_i \times Power_i \times Power\ Ratio_i \times Operation\ Time_i \times EF_i)$	Tier-3	Construction/Agriculture
	Non-energy industry	Tier-1/2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	Tier-1/2	Non-industry combustion
	New/renewable energy	Tier-2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	Non-classification		
				$E_i = \sum_i (Gasoline_i \times EF_i)$	Tier-1/2	Energy supply
				$E_i = \sum_i [(Paint_i \times EF_i + Thinner_i \times Specific\ Gravity_i) \times (1 - R_i)]$	Tier-1/2	Coating
				$E_i = \sum_i (No\ of\ People_i \times EF_i)$	Tier-1/2	Cleaning
			$E_i = \sum_i (No\ of\ Facilities_i \times EF_i)$	Tier-1/2	Washing	
			$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i) \times (1 - R_i)$	Tier-1/2	Other use	
Scope 2	Electricity	Tier-2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$			
	Water supply	Tier-2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	Non-classification		
	New/renewable energy	Tier-2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$			

a) E: Emission, b) A: Activity, c) EF: Emission Factor, d) R: Ratio, e) No: Number, f) LTO: Landing/Take-off Cycles, g) VKT: Vehicle Kilometer Traveled

고 철도는 서울시 내 이동구간과 사용된 연료사용량을 이용하여 tier-1과 tier-2 수준으로 산정하였다(Lee et al., 2012; Lee et al., 2011). 건설장비와 농업기계는 2010년 국립농업과학원에서 발행한 농업기계 및 농작업 기계화율 개발 연구 및 서울시 통계자료를 바탕으로 운영시간과 사용연료 등을 추출하여 온실가스는 tier-1과 tier-2, 대기오염물질은 tier-3 수준으로 산정하였다(National Academy of Agricultural Science, 2010). 탈루배출은 연료의 저류, 저장량 그리고 수송량을 이용하여 tier-1과 tier-2 수준으로 하였다.

Scope 2인 구매전력은 한국전력공사 통계연보에서 부문별 전력사용량을 취합하여 한국전력거래소(Korea Power Exchange)에서 제공하는 간접배출계수를 이용하여 tier-2 수준으로 온실가스 배출량을 산정하였다. 그리고 구매상수도 는 서울시 통계연보에서 자료를 추출하여 국내에서 개발한 간접배출계수를 이용하여 tier-2 수준으로 온실가스 배출량을 산정하였다.

신재생에너지 중 바이오에너지 및 폐기물은 생산된 전력 및 열량을 이용하거나, 생산된 에너지를 이용하여 tier-2 수준으로 온실가스 배출량을 scope 1으로 산정하였으며, 이 외의 태양광, 태양열, 연료전지, 풍력, 지열부분 신재생에너지는 scope 2로 산정하였다(Korea Energy Management Corporation, 2012; Korea Energy Management Corporation, 2011).

3. 결 과

3.1 서울시 온실가스-대기오염 통합 배출 목록작성

본 연구는 서울시 에너지부문 온실가스-대기오염 통합 배출 목록을 재 작성하였으며, 표 3에 재 작성된 배출 목록을 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 scope 1에 해당하는 통합 배출 목록작성은 대부분 가능하지만, scope 2인 구매전력과 구매상수도 및 신재생에너지(scope 1/2)는 온실가스에 한해서 목록작성이 가능한 것으로 나타났다.

배출원별 목록작성을 자세히 살펴보면, 에너지산업 온실가스 배출 목록은 에너지산업으로 작성하였으며, 대기오염 배출 목록은 에너지산업을 공공발전시설과 집단난방(지역난방)으로 작성하였다. 그리고 제조업 온실가스 배출 목록은 제조업과 건설업으로 목

록을 작성하였으며, 대기오염 배출 목록은 제조업과 기타부문으로 작성하였다. 탈루배출은 온실가스-대기오염 통합 배출 목록이 상호 유사성은 나타났지만, 목록 작성을 위한 일원화는 어려운 것으로 분석되었다. 이는 탈루배출의 경우 도시특성구조에 따라 배출 목록이 다르게 구축되며, 지역적 특성을 고려한 배출 목록 구축관리가 필요함을 의미한다. 예를 들어, 광산 지역은 광산개발에 의한 배출 목록작성이 중요하지만, 도시지역은 에너지저장과 수송과 같은 배출 목록 작성이 보다 중요하다는 것이다. 따라서 서울시는 도시지역으로 온실가스 배출 목록은 액체 수송, 정제석유제품, 가스수송 및 저장, 가스분배로 작성하였으며, 대기오염 배출 목록은 휘발유저장, 석유제품, 도장시설, 세척시설, 세탁시설, 기타사용으로 작성하였다.

3.2 부문별 직접 배출원별 온실가스-대기오염 통합 배출량

표 4는 2010년 서울시 에너지 사용량에 따른 부문별 직접 배출원별 온실가스-대기오염 통합 배출량을 나타내었다. 온실가스는 수송에서 47.3% 비에너지 산업부문에서 45.2%로 대부분을 차지한 반면, 대기오염물질은 수송과 탈루부문에서 가장 많은 배출량을 보였다(그림 1). 여기서 tonAP는 총 대기오염 발생량(Air Pollution, AP)으로 정의하였다.

에너지 산업은 서울시 내에서 운영되고 있는 공공발전시설 부문과 지역난방시설 부문으로 구분하였다. 에너지산업 부문은 투입되는 에너지양을 이용하여 점오염원으로 산정하였으며, 연간 온실가스와 대기오염물질 배출량은 각각 1,821,206 tonCO_{2eq}, 5,235 tonAP로 산정되었다. 시설별 발생량을 살펴보면, 마포구 공공발전시설 부문에서 발생한 연간 온실가스와 대기오염물질이 698,604 tonCO_{2eq}, 2,451 tonAP로 각각 에너지 산업 총 발생량의 38.4%, 46.8%의 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 지역난방시설은 강서구, 노원구, 양천구, 송파구, 마포구에 위치한 시설에 대해서 산정하였으며, 산정결과 강서구와 양천구에 위치한 지역난방시설에서 온실가스는 각각 365,409 tonCO_{2eq}, 365,406 tonCO_{2eq} 그리고 대기오염물질은 906 tonAP로 동일한 배출량을 보였다.

제조업부문은 식료품/담배, 목재, 인쇄, 화학, 요업, 1차 금속산업, 비금속산업, 금속기계, 운송장비 및 기타로 구분하였으며, 중복산정을 피하기 위하여 에너지는

Table 3. Comparison of reconstructed emission inventories between GHG and AP in energy sector of Seoul.

Contents	GHG (Greenhouse Gas)			AP (Air Pollution)		
	1	2	3	1	2	3
Scope 1	Energy industry			Energy industry	Pubic generation/District heating	
	Manufacturing/Construction	Off-road	Aircraft	Manufacturing	Manufacturing/Others	
			Passenger car		Off-road	Aircraft
	Transportation	On-road	Small truck	Transportation	On-road	Car, taxi, RV, Truck, Bus
			Heavy truck/bus			Special car, Motor cycle
			Motor cycle			
		Off-road	Railroad	Non-industry combustion	Off-road	Railroad, Construction equipment,
			Construction equipment			Agricultural machine
			Agricultural machine			
	Non-energy industry		Residential, Commercial, Public, Agri-fishery			Commercial, Public, Residential
New/renewable energy		Bio-energy	Non-classification			
		Wastes	Energy transportation		Gasoline	
Fugitive		Liquid transportation	Production process		Petroleum products	
		Refinery petroleum products	Organic solvent		Coating facilities	
		Gas transportation and storage			Cleaning facilities	
		Gas distribution			Washing facilities	
				Other use		
Scope 2	Electricity	Residential, Public, Service, Industry			Non-classification	
	Water supply	Home, Business, Commercial, Bath house, Others				
	New/renewable energy	Solar thermal				
		Solar PVs				
	Fuel cells					
	Wind power					
	Geothermal					

Table 4. GHG-AP integrated emissions from specific direct sources in Seoul, 2010. (Unit: ton)

Source		CO _{2eq}	AP	CO	NO _x	SO _x	TSP	PM ₁₀	VOCs	NH ₃
Total scope 1		27,891,375	283,701	99,139	74,435	3,102	2,640	2,610	99,811	1,964
Total energy		27,784,858	283,701	99,139	74,435	3,102	2,640	2,610	17,990	1,964
Scope 1	Energy									
	Sub-total	2,006,288	5,408	996	4,173	8	31	30	133	37
	Energy Industry	1,821,206	5,235	966	4,054	7	22	22	130	34
	Manufacturing	185,082	173	30	119	1	9	8	3	3
	Transportation									
	Sub-total	13,178,917	162,092	87,053	51,303	488	2,277	2,286	17,020	1,664
	Road	12,528,883	131,130	80,161	32,385	368	1,544	1,554	13,509	1,609
	Aircraft	392,404	2,358	1,006	1,050	107	16	15	164	-
	Train	25,843	872	205	504	13	33	33	83	1
	Construction	81,658	27,719	5,678	17,356	0.2	684	684	3,263	54
	Agriculture	150,103	13	3	8	0.00008	0.46	0.46	1	0.028
	Non-Energy									
	Sub-total	12,599,653	34,380	11,090	18,959	2,606	332	294	837	262
	Residential/Commercial	12,178,308	33,801	11,001	18,524	2,604	318	281	822	251
	Public	271,332	394	58	308	1	4	4	13	6
Agri-fishery	150,013	185	31	127	1	10	9	2	5	
New/renewable Energy		-836,934	-	-	-	-	-	-	-	-
Fugitive		943,451	81,821	-	-	-	-	-	81,821	-

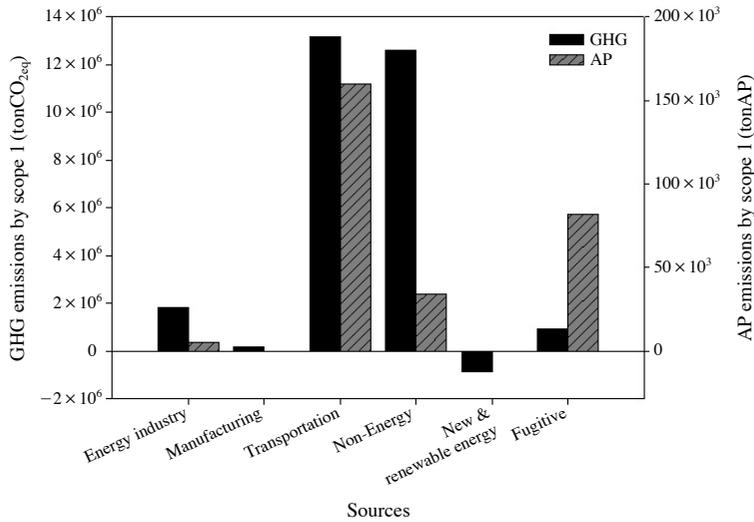


Fig. 1. GHG-AP integrated emissions from sectors in scope 1.

등유, 경유, 경질중유, 중유, 액화석유가스에 한해서 산정하였다. 산정결과 연간 온실가스 배출량은 185,082 tonCO_{2eq}이었으며, 대기오염물질은 173 tonAP이었다. 용도별 배출량을 살펴보면, 화학부문에서 46,841 tonCO_{2eq}로 가장 많은 온실가스 배출량을 보였지만, 대기오염물질은 요업부문에서 40.37 tonAP로 가장 많

은 배출량이 산정되었다. 이는 화학 및 요업부문 사용되는 연료의 사용 비율이 다르게 나타난 결과이다.

이동연소 부문은 도로수송과 비도로 수송으로 구분하여 산정하였으며, 이동연소 부문 연간 온실가스과 대기오염물질 배출량은 각각 13,178,917 tonCO_{2eq}, 162,092 tonAP로 산정되었다. 도로수송 부문 온실가

스-대기오염 통합 배출량을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 도로수송은 승용차, RV, 버스, 트럭, 이륜차로 구분하여 산정하였으며, 도로수송 부문 연간 온실가스 및 대기오염물질 배출량은 각각 12,528,883 tonCO_{2eq}, 131,130 tonAP로 산정되었다. 비도로 수송 부문은 항공기, 철도, 건설장비 및 농업기계로 구분하였으며, 항공기 부문에서 발생하는 연간 온실가스는 392,404 tonCO_{2eq}, 대기오염물질은 2,358 tonAP로 산정되었으며, 철도부문에서 발생한 연간 온실가스 및 대기오염물질은 각각 25,843 tonCO_{2eq}, 872 tonAP로 산정되었다. 건설장비와 농업기계 부문 온실가스 산정은 에너지 사용량을 이용하여 tier-1과 tier-2 수준에서 산정하였으며, 대기오염물질은 등록대수 및 운영시간 등을 이용하여 산정 tier-3 수준으로 산정하였다. 이에 따른 건설장비와 농업기계에서 발생한 온실가스는 각각 81,685 tonCO_{2eq}, 150,103 tonCO_{2eq}로 나타났으며, 대기오염물질은 각각 27,719 tonAP, 13 tonAP로 산정되었다. 비도로 수송 부문 중에서 온실가스는 항공기 부문, 그리고 대기오염물질은 건설장비 부문이 가장 큰 배출원으로 나타났다.

비에너지산업부문은 가정, 상업, 공공, 농림, 어업부 부문으로 구분하여, 이에 따라 산정된 연간 온실가스 발생량은 12,599,635 tonCO_{2eq}로 산정되었으며, 대기오염물질은 34,380 tonAP로 나타났다. 비에너지 산업부 부문에 사용되는 에너지는 대부분 도시가스로 95% 이상의 비율을 보였으며, 용도별로는 가정 및 상업 부문에서 온실가스와 대기오염물질이 각각 12,178,308 tonCO_{2eq}, 33,801 tonAP로 나타났다. 반면 가장 적게 산정된 부문은 농림·어업 부문으로 온실가스와 대기오염물질 배출량이 각각 150,013 tonCO_{2eq}, 185 tonAP로 나타났다. 이는 서울시의 경우 농림·어업 부문에 종사하는 인구 대비 상업 및 서비스 산업 등에 종사하는 인구에 집중되어 있기 때문이라고 사료된다.

탈루부문은 온실가스-대기오염 배출목록이 동일하지 않아 개별적 산정 후 배출량을 재구축하여 산정하였다. 즉, 탈루부문 중 온실가스 부문은 액체 수송, 정제된 석유제품수송, 가스수송 및 저장, 가스분배로 구분하였으며, 이 중 정제된 석유제품 부문은 비메탄휘발성유기화합물 (Non-Methane Volatile Organic Compounds, NMVOCs)에 대해서 배출량 산정을 하였다. 그리고 대기오염물질은 VOCs 단일 물질에 한해서 배출량을 산정하였으며, 에너지수송 및 저장, 유기용제

부 부문으로 구분하였다. 이에 따른 탈루부문 발생한 온실가스 및 NMVOCs는 각각 119,341 tonCO_{2eq}, 3,891 tonNMVOCs로 산정되었으며, 대기오염물질은 78,001 tonVOCs으로 산정되었다. 휘발성물질의 통합 산정을 위해 산정된 온실가스 부문의 NMVOCs와 대기오염물질 부문의 VOCs의 총합은 81,821 ton으로 산정되었다.

신재생에너지부문은 본 연구에서 scope 1으로 지정한 바이오에너지와 폐기물로 구분하여 온실가스에 한해서 산정하였다. 바이오에너지와 폐기물 부문은 직접 연소를 통하여 전력 및 열을 생산하기 때문에 생성된 에너지를 이용하였다. 서울시 신재생에너지 사용에 의해 산정된 온실가스 양은 836,934 tonCO_{2eq}로 나타났으며, 이는 scope 1 대비 약 3%에 상응하는 온실가스 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

3.3 부문별 간접 배출원별 온실가스-대기오염 통합 배출량

2010년 서울시 에너지 사용량을 이용한 부문별 간접 배출원별 온실가스-대기오염 통합 배출량은 표 5와 그림 2에 나타내었다.

부문별 간접 배출원에 따른 배출량은 온실가스에 한해서 산정하였다. 간접 배출원별 온실가스 배출 비율은 구매전력이 연간 발생량의 98.6%로 가장 많은 배출을 하였으며, 구매상수도가 1.6%, 그리고 신재생에너지는 scope 2 온실가스 배출량 대비 0.2%의 감축비율을 차지하였다.

Table 5. GHG emissions from specific indirect sources in Seoul, 2010. (Unit: ton)

Sources		CO _{2eq}
Total scope 2		22,648,191
Electricity	Sub-total	22,319,472
	Residential	6,173,658
	Public	1,675,999
	Service	13,360,963
	Industry	1,108,852
Scope 2	Sub-total	371,937
	Home	241,796
	Business	29,602
	Commercial	81,617
	Bath House	10,271
Water supply	Others	8,651
	New/renewable energy	-43,218

부문별 간접 배출원별 온실가스 배출량을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 구매전력의 경우 연간 온실가스 배출량은 22,319,472 tonCO_{2eq}로 산정되었으며, 용도별로는 서비스 부문이 13,360,963 tonCO_{2eq}로 간접 배출원별 온실가스 총배출량의 약 60%에 해당하는 배출량 비율을 보였다. 다음으로 가정 부문이 6,173,658 tonCO_{2eq}로 산정되었으며, 이는 약 27.7%의 비율을 차지하고 있어 서비스와 가정 부문에서 간접 배출원별 온실가스 총배출량의 약 87.7%의 배출 비율을 보였다.

구매상수도에 의한 연간 온실가스 배출량은 371,937 tonCO_{2eq}으로 나타났으며, 용도별로는 가정용이 241,796 tonCO_{2eq}로 약 65%의 비율을 보였으며, 다음으로 상업용이 81,617 tonCO_{2eq}로 약 22%를 차지하는 것으로 나타났다.

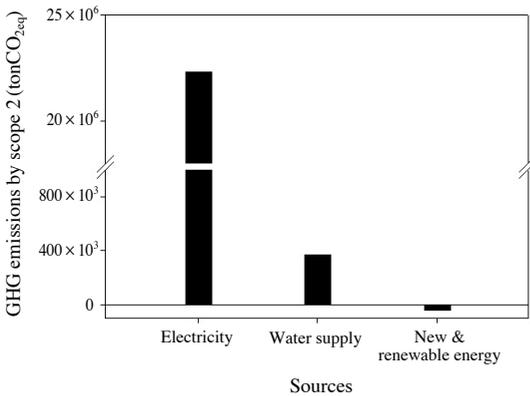


Fig. 2. GHG emissions from sectors in scope 2.

신재생에너지부문은 본 연구에서 scope 2로 지정한 태양열, 태양광, 풍력, 연료전지, 지열로 구분하여 산정하였다. 앞서 설명한 신재생에너지 사용으로 인해 산정된 총 온실가스는 43,218 tonCO_{2eq}으로, 이는 scope 2 대비 0.2%의 온실가스 감축효과가 있는 것으로 나타났다. 신재생에너지원별로는 연료전지가 11,735 tonCO_{2eq}으로 약 27%의 비율을 차지하였고, 다음으로 태양광과 태양열이 5,884 tonCO_{2eq} (13.6%), 5,281 tonCO_{2eq} (12.2%)로 유사한 수준으로 산정되었다.

3. 4 서울시 직·간접 온실가스-대기오염 통합 배출량

3.2 및 3.3절에서 산출한 부문별 직접 및 간접 배출량으로부터 직·간접 온실가스-대기오염 통합 배출량을 산정한 결과를 표 6에 나타내었다.

표에서 보는 바와 같이 연간 온실가스 발생량은 50,530,566 tonCO_{2eq}이었으며, 그 중 scope 1이 54.8%, scope 2가 45.2%이었다. 대기오염물질은 283,701 tonAP로 산정되었으며, scope 1에서 100% 배출된 것으로 산출되었다. 이에 대한 이유는 에너지부문의 경우, 온실가스는 직·간접 통합 배출량 산정이 가능하지만, 대기오염물질은 scope 1에 한해서 산정이 가능하기 때문에 총 배출량과 scope 1의 배출량이 동일한 값을 보여준다. 또한 국립환경과학원에서 산정한 2010년 기준 서울시 에너지부문 대기오염물질 배출량 285,483 ton (전체 대기오염물질 배출량 288,642 ton, 비산먼지 및 식생 제외) 대비 0.6% 적은 산정량을 보였으며 (NIER, 2012), 이는 세부운영경계 범위설정 등으로 인하여 차이가 발생한 것으로 향후 지속

Table 6. Total GHG-AP integrated emissions from direct and indirect sources in Seoul, 2010.

(Unit: ton)

Sources	CO _{2eq}	AP	CO	NO _x	SO _x	TSP	PM ₁₀	VOCs	NH ₃
Total (Scope 1 and 2)	50,539,566	283,701	99,139	74,435	3,102	2,640	2,610	99,811	1,964
Total scope 1	27,891,375	283,701	99,139	74,435	3,102	2,640	2,610	99,811	1,964
Energy industry	1,821,206	5,235	966	4,054	7	22	22	130	34
Manufacturing	185,082	173	30	119	1	9	8	3	3
Transportation	13,178,917	162,092	87,053	51,303	488	2,277	2,286	17,020	1,665
Non-energy	12,599,653	34,380	11,090	18,959	2,606	332	294	837	262
New/renewable energy	-836,934	-	-	-	-	-	-	-	-
Fugitive	943,451	81,821	-	-	-	-	-	81,821	-
Total scope 2	22,648,191	-	-	-	-	-	-	-	-
Electricity	22,319,472	-	-	-	-	-	-	-	-
Water supply	371,937	-	-	-	-	-	-	-	-
New/renewable energy	-43,218	-	-	-	-	-	-	-	-

적인 연구로 일원화된 배출량 산정이 필요하다고 사료된다.

온실가스는 구매전력 부문이 22,319,471 tonCO_{2eq}로서 서울시 직·간접 온실가스 총 배출량의 44.2%, 수송부문이 13,178,917 tonCO_{2eq}로서 26.1%, 그리고 비에너지 산업이 12,599,653 tonCO_{2eq}로서 24.9%의 순으로 나타났다. 이러한 결과는 서울시 에너지부문 온실가스 감축실천계획(action plan)에 있어 우선적으로 고려시켜야 할 부분으로 사료된다.

대기오염물질의 경우 수송부문 162,092 tonAP, 탈루부문 81,821 tonVOCs(AP)로 연간 발생량의 85.9%의 비율을 차지하였다. 대기오염물질별 배출량 구성을 살펴보면, CO, NO_x, PM₁₀ 및 NH₃는 수송 부문, SO_x는 비에너지 산업, 그리고 VOCs는 탈루 부문에서 가장 많이 배출하고 있었다. 특히, 탈루부문에서 전량 발생하는 VOCs(휘발성유기화합물질)는 인위적 발생원으로서 정확한 발생원 규명과 더불어 목록 구성에 따른 배출량 산정을 하여 탈루되는 VOCs를 제어해야 할 필요가 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

2010년 서울시 에너지사용량에 따른 직·간접 온실가스-대기오염 통합 배출량 산정을 위한 인벤토리 구축 연구를 통하여 서울시 에너지 배출원별 배출 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

서울시 에너지 사용량에 따른 온실가스-대기오염 통합 배출원 목록작성은 대부분 배출목록이 상호 적합하는 것으로 나타나 통합 인벤토리 구축 및 배출량 산정이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 구매전력과 구매상수도과 같은 항목은 온실가스에 한정되어 산정 가능하므로 이를 대기오염물질까지 확대하기 위한 간접 대기오염물질 배출계수 개발 등이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

2010년 서울시 에너지부문 온실가스-대기오염 통합 배출량 산정결과 연간 온실가스와 대기오염물질은 각각 50,530,566 tonCO_{2eq}, 283,701 tonAP으로 산정되었으며, 온실가스 배출 비율은 scope 1이 54.8%, scope 2가 45.2%의 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

Scope별 발생 특성을 살펴보면, scope 1에서 발생

하는 온실가스는 수송부문이 13,178,917 tonCO_{2eq}(47.3%)로 가장 많은 발생량을 보였으며, 다음으로 비에너지 산업부문이 12,599,653 tonCO_{2eq}(45.2%)로 나타났다. 대기오염물질은 수송부문이 162,092 tonAP, 탈루부문이 81,821 tonVOCs(AP)로 총 발생량의 85.8%의 비율을 차지하였으며, 개별 대기오염물질별로는 수송 부문이 CO, NO_x, TSP, PM₁₀ 및 NH₃, 비에너지 산업이 SO_x는, 그리고 탈루 부문이 VOCs를 가장 많이 배출하고 있었다.

Scope 2에서는 구매전력이 연간 22,319,472 tonCO_{2eq}(98.6%)의 온실가스를 배출하였으며, 다음으로 구매상수도가 371,937 tonCO_{2eq}(1.6%). 신재생에너지 사용으로 인한 온실가스 감축효과는 scope 1, scope 2 대비 각각 836,934 tonCO_{2eq}(3%), 43,218 tonCO_{2eq}(0.2%)으로 산정되었다.

본 연구를 바탕으로 향후 온실가스-대기오염 통합 배출량을 효율적으로 관리하기 위하여, 기술과 정책 등이 접목된 통합 목록작성과 이에 따른 통합 배출량 산정 및 예측 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 : 2013-1247).

References

GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea) (2014) <http://www.gir.go.kr/>.

IEA (International Energy Agency) (2012) 2012 Key World Energy Statistics.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006) 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013) Climate Change 2013.

Kim, J.-B., H.-S. Park, and D.-K. Kim (2012a) Calculation and Evaluation of Monthly Sectoral GHG Emissions of Seoul through Analysis of Energy Consumption from 1999 to 2009, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(4), 466-476. (in Korean with

- English abstract)
- Kim, J.-B., J.-W. Chung, S.-W. Suh, S.-H. Kim, and H.-S. Park (2011) Comparison of Direct and Indirect CO₂ Emission in Provincial and Metropolitan City Governments in Korea : Focused on Energy consumption, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 33(12), 874-885.
- Kim, K.-D., T.-J. Lee, W.-S. Jung, and D.-S. Kim (2012b) Development of Traffic Volume Estimation System in Main and Branch Roads to Estimate Greenhouse Gas Emissions in Road Transportation Category, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(3), 233-248. (in Korean with English abstract)
- Korea Energy Economics Institute (2011) Yearbook of Regional Energy Statistics.
- Korea Energy Management Corporation (2011) New and Renewable Energy Statistics 2010 (2011 Edition).
- Korea Energy Management Corporation (2012) New and Renewable Energy Statistics 2011 (2012 Edition).
- Korea Environment Corporation (2012) Guidelines for Local Government Greenhouse Gas Inventories (Ver.3.0).
- Korea Meteorological Administration (2011) Annual Climatological Report 2011.
- Korea Power Exchange (2012) <http://www.kpx.or.kr/>.
- Korea Transportation Safety Authority (2011) <http://www.ts2020.kr/>.
- Lee, J.-Y., W.-S. Jung, I.-H. Hwang, and Y.-K. Kim (2011) The Evaluation of GHG Emissions in Railroad Construction Sector, Journal of The Korean Society for Railroad, 14(3), 271-275. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.-Y., Y.-K. Kim, C.-K. Lee, and Y.-H. Rhee (2012) A Study on the Calculation of GHG Emission for Domestic Railroad Transport based on IPCC Guideline, Journal of The Korean Society for Railroad, 15(4), 408-412. (in Korean with English abstract)
- National Academy of Agricultural Science (2010) <http://www.naas.go.kr/>.
- NIER (National Institute of Environment Research) (2010) Assessment Manual of National Air Pollutant Emission Inventory (II).
- NIER (National Institute of Environment Research) (2012) National Air Pollutants Emission 2010.
- NIER (National Institute of Environment Research) (2014) <http://airemiss.nier.go.kr/>.
- Seoul City (2011) Seoul Statistical Yearbook 2011.
- Seoul City (2013) <http://www.seoul.go.kr/>.
- Shon, Z.-H., S.-K. Song, T.-K. Yoon, and G.-C. Lee (2013) Emissions of Air Pollutants and Greenhouse Gases from Aircraft Activities at the Small Scale Airports, Journal of Environmental Science International, 22(7), 823-836. (in Korean with English abstract)
- Song, C.-K., S.-K. Lee, and J.-S. Yoon (2011) A Review of the Integrated Strategy for Climate Change and Air Pollution Management, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(6), 805-818. (in Korean with English abstract)
- Song, S.-K. and Z.-H. Shon (2012) Emission of Air Pollutants and Greenhouse Gases from Aircraft Activities at the Gimhae international Airport, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(2), 190-202. (in Korean with English abstract)