

ORIGINAL ARTICLE

대학 내 에너지 소비에 따른 온실가스-대기오염 통합 인벤토리 및 대체 에너지 사용 시나리오 분석

정재형 · 권오열^{1)*}

서울과학기술대학교 에너지환경공학과, ¹⁾서울과학기술대학교 환경공학과

A Study of GHG-AP Integrated Inventories and Alternative Energy Use Scenario of Energy Consumption in the University

Jae-Hyung Jung, O-Yul Kwon^{1)*}

Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea*

Abstract

The university is one of the main energy consumption facilities and thereby releases a large amount of greenhouse gas (GHG). Accordingly, efforts for reducing energy consumption and GHG have been established in many local as well as international universities. However, it has been limited to energy consumption and GHG, and has not included air pollution (AP). Therefore, we estimated GHG and AP integrated emissions from the energy consumed by Seoul National University of Science and Technology during the years between 2010 and 2012. In addition, the effect of alternative energy use scenario was analysed. We estimated GHG using IPCC guideline and Guidelines for Local Government Greenhouse Inventories, and AP using APEMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2013 and Air Pollutants Calculation Manual. The estimated annual average GHG emission was 11,420 tonCO_{2eq}, of which 27% was direct emissions from fuel combustion sectors, including stationary and mobile source, and the remaining 73% was indirect emissions from purchased electricity and purchased water supply. The estimated annual average AP emission was 7,757 kgAP, of which the total amount was from direct emissions only. The annual GHG emissions from city gas and purchased electricity usage per unit area (m²) of the university buildings were estimated as 15.4 kgCO_{2eq}/m² and 42.4 tonCO_{2eq}/m² and those per person enrolled in the university were 210 kgCO_{2eq}/capita and 577 kgCO_{2eq}/capita. Alternative energy use scenarios revealed that the use of all alternative energy sources including solar energy, electric car and rain water reuse applicable to the university could reduce as much as 9.4% of the annual GHG and 34% of AP integrated emissions, saving approximately 400 million won per year, corresponding to 14% of the university energy budget.

Key words : University, Energy consumption, GHG (Greenhouse Gas), AP (Air Pollution), Energy use scenario

Received 28 July, 2014; Revised 12 September, 2014;

Accepted 16 September, 2014

*Corresponding author : O-Yul Kwon, Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea
Phone: +82-2-970-6616
E-mail: oykwon@seoultech.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

18세기 산업혁명 이후 100여 년간 대기 중 온도는 0.74℃ 상승하였고, 1900년 중반 이후 해수면은 매년 1.8 mm씩 증가하였다(IPCC, 2007). 온실가스 및 대기 오염물질의 증가는 지구온난화 뿐 아니라 생태계파괴, 경제 산업, 보건 등의 문제들도 나타나고 있다. 이에 따라 국제적으로 지구환경의 위기에 대응하기 위하여 1992년 6월 브라질 리우환경회의에서 기후변화협약이 체결된 후, 1997년에 교토의정서가 채택되었다. 우리나라는 2002년 11월 8일 교토의정서를 비준하였지만 비부속서(annex-II) 국가로 분류되어 의무대상 국가에는 포함되지 않았지만, 2010년 기준 우리나라는 세계 10위에 해당하는 많은 에너지를 소비하고 있다(IEA, 2012). 정부는 2009년 11월 국무회의에서 2020년까지 2005년 대비 4%, 2020년까지 BAU(Business As Usual) 대비 30%를 감축하는 온실가스 감축목표를 확정하였다. 이를 목표로 하여 정부에서는 온실가스 다 배출 및 에너지 다소비 사업장에 대하여 온실가스 감축 및 에너지 절약 목표를 설정, 관리하는 온실가스 에너지 목표관리제를 제정하고, 약 600 여개의 사업장을 대상으로 전체 사업장 배출량의 90% 이상을 체계적으로 관리하는 목표를 설정하였다(Ministry of Environment, 2011b). 온실가스 목표관리제를 시범적으로 운영하기 위해 정부는 공공기관 목표관리제를 추진하였는데, 이 중 에너지 다소비 건물로 국·공립 대학이 포함되어 공공기관 목표관리제에 포함되었다(Ministry of Environment, 2011c). 2012년 에너지관리공단 통계연보에 의하면 2006년부터 2011년까지 우리나라 전체 에너지 사용량은 18.5%가 증가한 반면 대학의 건물 에너지 사용량은 29%가 증가하였다(Korea Energy Management Corporation, 2012). 이에 대학은 에너지 사용량을 체계적으로 관리 및 에너지 사용량에 따른 배출량 인벤토리 구축이 이루어져야 한다. 최근 국제적으로 그린캠퍼스(green campus)라는 지속 가능한 캠퍼스를 만들고자 노력하고 있으며, 이를 행하기 위해서는 대학 내 활동에 의한 신뢰성 있는 배출량 인벤토리 구축이 중요하다. 미국은 2007년 152개 대학 총장들이 미국대학총장기후변화위원회(American College and University President Climate Commitment)를 구성하여 대학 캠퍼스 내에서 배출하는 온실가스를 저감하

는 프로그램을 진행하고 있다(ACUPCC, 2007). 국내 대학도 한국그린캠퍼스 협의회를 중심으로 인벤토리 구축을 하고 있으며(Korea Association for Green Campus Initiative, 2012), 그린캠퍼스는 대학의 온실가스 배출량 감축과 더불어 주변 지역사회로의 교육 및 경제 적 과급효과를 기대하고 있다. 국내 대학의 온실가스 인벤토리 선행연구 사례를 들어보면, 서울대학교의 경우 국내 대학 중 가장 많은 에너지를 소비하고 있으며, 서울대학교 병원 등과 같은 별도의 거대 건물은 제외하고 2005~2009년까지의 순수한 캠퍼스를 대상으로 온실가스 인벤토리를 구축하였다(Ministry of Environment, 2011a). 강원대학교도 2005~2009년까지 3년간 온실가스 인벤토리를 구축하였으며, 인벤토리 구축 결과를 이용하여 대학 내 부문별 온실가스 감축 잠재량을 평가하였다(Park 등, 2012). 또한 서울시립대학교는 2009년 1년간 대학에서 소비되는 에너지의 소비 패턴을 이용하여, 에너지 사용별 및 용도별로 분리하여 온실가스 인벤토리를 구축하였다(Kim 등, 2012). 국외 대학의 경우, 루이빌 대학교는 2006년을 기준으로 2008년까지 3년간의 온실가스 인벤토리를 구축하였으며, 보고된 배출량을 기준으로 캠퍼스 내 온실가스 감축 대응대책 등의 노력을 하였다(University of Louisville, 2009). 버클리 대학교 2006년부터 2008년까지 대학 내 온실가스를 구축하였으며, 이를 바탕으로 2014년까지 1990년 수준으로 온실가스를 줄이는 것을 목표로 인벤토리를 구축하였다(University of California, 2008). 마이애미 대학교는 1998년부터 2008년까지 온실가스 인벤토리를 구축하였으며, 단과대학별로 배출량을 산정 후 단과대학별 배출량 감축을 위한 방법을 강구하였다(University of Miami, 2008). 이처럼 국내의 대학에서는 인벤토리 구축 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 이를 토대로 대학 내 온실가스 감축잠재량을 도출하고 있다(Song 등, 2011). 하지만 인벤토리 구축 연구는 온실가스 부문 연구에 집중되어 있으며, 대학 내 대기오염물질 산정은 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 또한 대학 내 에너지 연소에 따른 배출목록을 일원화하여 온실가스와 대기오염물질의 배출원 관리를 위한 통합 환경관리 구축을 구현하여 배출량 조절 및 제어하는 배출관리 시스템 구축이 필요하다.

따라서 본 연구는 서울과학기술대학교를 대상으로

대학 내 소비되는 에너지 사용량을 파악하고, 이에 따른 온실가스-대기오염 통합 인벤토리를 구축하였다. 또한 에너지원단위 분석과 대체 에너지 사용량 패턴 시나리오를 작성하여, 시나리오 별 온실가스-대기오염 통합 시나리오 분석 및 대체 에너지 비용분석을 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구의 범위

본 연구의 공간적 배경은 서울시 노원구 공릉동에 위치한 서울과학기술대학교로 선정하였으며, 시간적 배경은 2010~2012년(3년)을 대상으로 하였다. 2012년 기준 서울과학기술대학교의 교지면적은 508,690 m², 건축면적은 55,883 m²이다. 그리고 6개의 단과대학교와 23개의 학과 10개의 계약학과로 구성되어 있으며, 대학원은 2개의 특수대학원과 4개의 전문대학원 그리고 1개의 일반대학원으로 구성되어 있다. 대학 구성원은 재학생 13,172명, 교원 474명, 직원 230명으로 총 13,876명이다(Seoul National University of Science and Technology, 2010~2012). Table 1은 연구대상지역의 특성을 보여주고 있으며, Fig. 1은 연구의 흐름도이다.

Table 1. Overview of the target university in 2012

Location	Seoul, Gongreung dong
Year	2012
Total school area (m ²)	508,690
Playgrounds (m ²)	37,447.0
Area of school site (m ²)	471,243
Building area (m ²)	55,883.0
Total building area (m ²)	193,845
People (person)	13,876.0

2.2 운영경계설정 및 활동도 자료

본 연구에서 온실가스 배출항목 설정은 IPCC(2006) 가이드라인에서 제시하는 항목을 근거로 3가지 항목(CO₂, CH₄, N₂O) 그리고 대기오염물질은 EEA(2013) 및 NIER(2010)을 근거로 하여 7가지 항목(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, VOCs, NH₃)을 대상으로 인벤토리를 구축하였다. 에너지활동도(activity) 자료는 에너지 사용원을 조사하여 자료를 수집, 구축하는 상향식접근법(Bottom-Up Approach, BAU)을 적용하였으며, 2010~2012년 대학의 에너지 사용량을 바탕으로 자료를 구축하였다. 운영경계설정(organizational boundaries)은 WRI/WBCSD GHG protocol를 기반으로 하였으며(WRI,

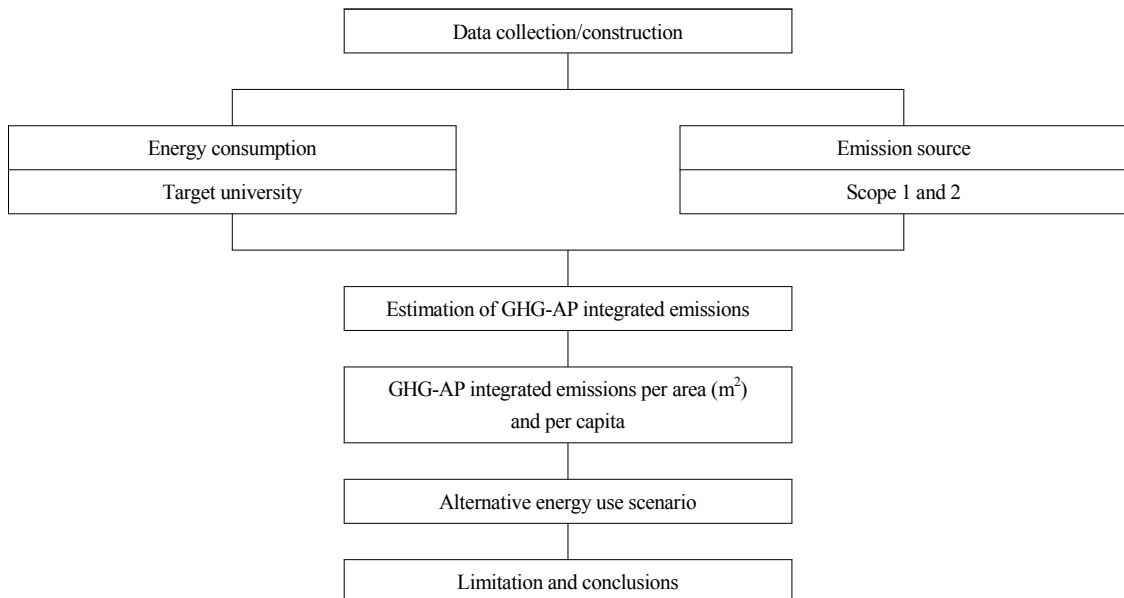


Fig. 1. Flow chart of this study.

Table 2. GHG and AP inventory boundary at the target campus

Contents		Specific sources		
Subject	Seoul National University of Science & Technology			
Year	2010~2012 (yr)			
GHG (Greenhouse Gas)	Carbon Dioxide (CO ₂)			
	Methane (CH ₄)			
	Nitrous Oxide (N ₂ O)			
AP (Air Pollution)	Carbon Monoxide (CO)			
	Nitrogen Oxide (NO _x)			
	Sulfur Oxide (SO _x)			
	Total Suspended Particulate (TSP)			
	Particulate Matter (PM ₁₀)			
	Volatile Organic Compounds (VOCs)			
	Ammonia (NH ₃)			
Scope (Emission Source)	Scope 1 (Direct Source)	Stationary combustion		Natural gas
				Kerosene
	Scope 2 (Indirect Source)	Mobile combustion	Transportation	Gasoline
				Diesel
				Electricity
		Water supply		

2001), 운영경계설정 시 scope 1(direct source, 직접발생원)은 고정연소(LNG, kerosene)와 이동연소(gasoline, diesel)로 구분하였으며, scope 2(indirect source, 간접발생원)는 구매전력(purchased electricity)과 구매상수도(purchased water supply) 사용량으로 조직경계를 설정하였다(IPCC, 2006). 하지만 폐기물처리 등과 같은 scope 3(others, 기타배출원)은 민간업체에서 전량처리하고 있으며, 자료에 대한 획득이 어려워 본 연구에서는 제외하였다. 본 연구에서 이용한 운영경계 설정 현황은 Table 2에 제시하였다.

2.3 배출량 산정방법

본 연구에서 온실가스 배출량 산정방법은 IPCC(2006) 가이드라인과 2012년도 한국환경공단에서 발행한 지자체온실가스 배출량 산정지침을 바탕으로 산정하였으며, 대기오염물질 배출량 산정방법은 EEA에서 발행한 EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013과 2010년 국립환경과학원에서 발행한 대기오염물질산정방법 편람 및 선행연구를 참고로 하였다(EEA, 2013;

GRI, 2010; Korea Environment Corporation, 2012; Ministry of Environment, 2011d; NIER, 2010). 온실가스 배출계수는 공공기관의 배출계수를 사용하여 인벤토리를 구축하였으며, 대기오염물질 배출계수는 대기환경보전법 시행규칙, 국립환경과학원의 연구결과 중에서 검토를 통해 선정하여 구축하였다(Kim 등, 2011; Kim 등, 2012b; Korea Power Exchange, 2012; Lee 등, 2012). 본 연구에 이용된 배출계수를 Table 3에 나타내었다. 온실가스와 대기오염물질 배출량 산정의 일관성 및 호환성을 유지하기 위하여 배출계수를 tier 1, 2, 3로 구분하고 있다. 즉, tier 1 방법은 해당연료의 부문별 연료사용량과 기본 배출계수(default value)를 곱하는 방식으로 산정하며, tier 2는 해당 연료의 사용량과 국가 배출계수(domestic value)를 곱하는 방식이다. 그리고 tier 3는 기술 등이 적용된 세부 배출계수(specific value)로, 사용된 연료연소의 종류와 연소기술, 공정기술, 품질유지, 연료연소 장비 등이 적용된 배출계수이다. 본 연구에서는 구매전력 및 구매상수도 부문과 연료 연소 부문의 CO₂는 tier 2, 이 외는 tier 1으로 산정하였다.

Table 3. Emission Factors used for fuel types

Contents	Unit	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Natural gas	Kg/TJ	56,467	5	0.1	
Indoor kerosene	Kg/TJ	71,500	10	0.6	
Gasoline	Car		9	10	
	Light truck	Kg/TJ	72,233	7	10
	Heavy truck/bus			5	43
Diesel	Car		1	2	
	Light truck	Kg/TJ	72,600	2	5
	Heavy truck/bus			3	2
Electricity	tonCO _{2eq} /KWh	0.0004714	5.4×10 ⁻⁹	2.6×10 ⁻⁹	
Water supply	gCO _{2eq} /m ³	332	-	-	

3. 결과 및 고찰

3.1 서울과학기술대학교 온실가스-대기오염 통합 배출량

Table 4는 2010~2012년 서울과학기술대학교에서 사용한 에너지를 나타낸 것이며, 대학 내 대부분의 에너지 사용 비중은 도시가스와 구매전력이다. 특히, 서울과학기술대학교는 구매전력의 사용 비율이 70% 이상으로 나타났다. 에너지 사용량에 따른 2010~2012년 서울과학기술대학교에서 배출된 온실가스 및 대기오염물질은 Fig. 2와 같으며, 3년간 배출된 온실가스 평균은 11,420 tonCO_{2eq}이었으며, 대기오염물질은 7,755 kgAP이었다. 본 연구에서 산정한 온실가스 배출량은 2005~2009년 5년 평균 강원대학교 온실가스 배출량인 20,345 tonCO_{2eq} 대비 적은 배출량을 보였으며(Park 등, 2012), 2009년 서울시립대 온실가스 연간 총량인 10,452 tonCO₂와는 유사한 수준에서 산정되었다(Kim 등, 2012a). 온실가스와 대기오염 배출량은 2010년에 각각 11,773

tonCO_{2eq}, 8,217 kgAP로서 기간 중 가장 많은 배출량을 보였으며, 2012년에는 2010년 대비 온실가스는 약 4.5% 저감되었으며, 대기오염물질은 약 9.7% 저감되었다. 온실가스와 대기오염물질의 감소는 도시가스의 사용량 감소에 의한 것으로, 2010년 에너지 사용량이 1,503 toe로 가장 많은 에너지를 사용하였으며, 2011, 2012년은 각각 1,377 toe와 1,303 toe로 사용량이 저감되는 것으로 나타났다. 이는 대학 내 적정 실내 온도를 유지하기 위하여 겨울철 난방 시간을 고정하는 고정 난방시간과 중앙에서 보일러를 제어하는 중앙제어시스템 그리고 화장실 등의 개별적 온수 보일러 이용에 의한 것으로 사료된다. 반면 대학 에너지 사용량의 70% 이상을 차지하는 구매전력은 2010년에 3,800 toe 이었으며, 2012년에 4,113 toe로 증가하는 추세를 보였다. 2010~2012년 대학 내 총 에너지 사용량은 각각 5,341 toe, 5,184 toe, 5,455 toe으로 점차적으로 에너지 사용량이 증가하는 추세를 보였지만, 온실가스와 대기오염물질

Table 4. Annual energy activities at specific sources in the university

Scope	Specific source		Unit	Energy consumption		
				2010	2011	2012
Scope 1	Stationary combustion	Natural gas	m ³	1,424,464.0	1,305,105.0	1,249,476.0
		Kerosene	L	2,550.0000	9,360.0000	8,320.0000
	Mobile combustion	Gasoline	L	4,065.0000	3,899.0000	4,393.0000
		Diesel	L	35,923.0000	32,896.0000	30,516.0000
Scope 2	Electricity	kwh	17,673,820	17,514,092	17,883,809	
	Water supply	m ³	275,672.00	310,025.00	280,494.00	

배출량은 감소되는 경향성을 보였다. 이는 도시가스 사용량 저감량이 따른 온실가스 및 대기오염물질 저감율이 구매전력 사용량 증가에 따른 온실가스 배출량 대비 도시가스에 의해 저감되는 오염물질의 양이 상대적으로 크기 때문에 전체적으로 저감되는 특성을 보였다.

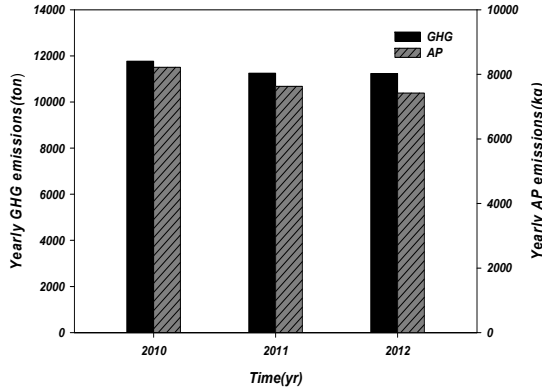


Fig. 2. Yearly GHG and AP integrated emissions in the university from 2010 to 2012.

3.2 배출원별 온실가스-대기오염 통합 배출량

Table 5는 배출원별 온실가스 및 대기오염물질 배출량으로서, 3년간 연평균 scope 1에서 배출된 온실가스 및 대기오염물질은 각각 3,101 tonCO_{2eq}, 7,757 kgAP

그리고 scope 2에서 배출된 온실가스는 8,319 tonCO_{2eq}으로 나타났다. Scope 2인 구매전력과 구매상수도는 scope 1과 달리 온실가스-대기오염 통합 산정이 불가능하며, 이는 외부로부터 공급되는 간접배출계수(Indirect Emission Factor, IEF)를 이용하여 온실가스 부문에 대해서만 산정이 가능하기 때문이다. 온실가스는 도시가스와 전력이 98.2%의 비율을 차지하고 있으며, 구매전력은 도시가스에 비하여 약 2.7배 높은 배출량을 보였다. 대기오염물질은 도시가스에서 전체 배출량의 91%를 차지하고 있으며, NO_x가 전체 발생량의 68.55%를 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 다음으로 CO가 25.32%로 차지하고 있어서, 대학 내 발생하는 대기오염물질은 NO_x와 CO가 93.87%의 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

배출원별 통합 배출량을 구체적으로 살펴보면, scope 1 중에서 도시가스는 대학에서 가장 많은 에너지를 사용하는 연료로써 도시가스에서 3년 평균 배출된 온실가스 및 대기오염물질은 각각 2,988 tonCO_{2eq}, 7,089 kgAP로 산정되었다. 서울과학기술대학교는 2010년도에 도시가스에서 가장 많은 3,225 tonCO_{2eq}의 온실가스와 7,613 kgAP의 대기오염물질이 발생되었으며, 이후 대학의 에너지 정책과 도시가스 사용 감축 정책을 실행한 결과 온실가스는 연간 3,000 tonCO_{2eq} 대기오염물질

Table 5. Average GHG and AP integrated emissions by energy activities from 2010 to 2012

Contents	Total	Scope 1				Scope 2		
		Stationary Source		Mobile Source		Purchased		
		City gas	Kerosene	Gasoline	Diesel	Electricity	Water supply	
GHG	tonCO _{2eq}	11,420.75	2,988.87	16.6300	9.57000	86.0200	8,223.80	95.8600
	tonCO ₂	11,294.86	2,981.69	16.5400	9.15000	85.0200	8,202.46	
	tonCH ₄	0.360000	0.26000	0.00233	0.00114	0.00224	0.09300	-
	tonN ₂ O	0.070000	0.01000	0.00014	0.00127	0.00300	0.06300	
AP	kgAP	7,755.64	7,089.33	25.5800	16.7600	625.46		
	kgCO	1,964.22	1,782.61	4.05000	11.5000	166.06		
	kgNO _x	5,317.09	4,907.49	16.1800	1.48000	391.94		
	kgSO _x	17.2400	13.2600	1.15000	0.01000	2.8200		
	kgTSP	41.4100	39.7900	1.62000	-	-		
	kgPM ₁₀	52.3900	39.7900	1.48000	-	12.6000		
	kgVOCs	291.650	238.7400	0.45000	0.55000	51.9000		
	kgNH ₃	71.6400	67.6400	0.65000	3.21000	0.14000		

은 연간 7,000 kgAP 이하로 배출량이 감소되었다. Fig. 3a는 월별 도시가스에서 발생하는 온실가스와 대기오염물질을 나타낸 것이며, 그림에서 보는 바와 같이 도시가스 사용량에 따른 월별 온실가스 발생량이 1월과 12월이 가장 많았으며 6월 달이 가장 적은 달로 나타났다. 이는 겨울철에 난방에 의해 도시가스 사용량이 증가했으며, 여름철에는 취사와 급탕용으로 사용되어지며 난방은 하지 않기 때문이라고 사료된다. 등유에서 발생한 온실가스 및 대기오염물질은 3년 평균 16.63 tonCO_{2eq}, 25.58 kgAP로 산정되었다. 본 연구에서 2010년도 등유 사용에 의한 온실가스 및 대기오염물질 발생량이 가장 적게 나타났는데, 이는 등유 활동도 수집 및 자료 구축 시 2009년도 등유 사용량에 포함되어 2010년 초 등유

사용량의 자료는 구축이 이루어지지 않았기 때문이다. 또한 등유의 사용은 겨울철 난방용으로 전량 이용되어 11월부터 다음연도 2월까지만 사용되어 지는 것으로 나타났다. 이동연소인 휘발유와 경유는 여름철에 다소 증가하는 경향성이 있지만 평균적으로 휘발유는 9.57 tonCO_{2eq}, 경유는 86.02 tonCO_{2eq}의 온실가스가 산정되었으며, 대기오염물질은 휘발유와 경유가 각각 17 kgAP, 625 kgAP로 산정되었다. 대학 내 공공 차량은 공공의 목적으로 이용되므로, 월별 다소간의 차이는 존재하지만 계절별 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보인다. 향후, 이동연소에 의한 보다 신뢰성 있는 온실가스-대기오염 통합 배출량을 산정하기 위해서는 공공 차량 뿐 아니라 개인소유 차량에 의한 통합 배출량 산정 연구가

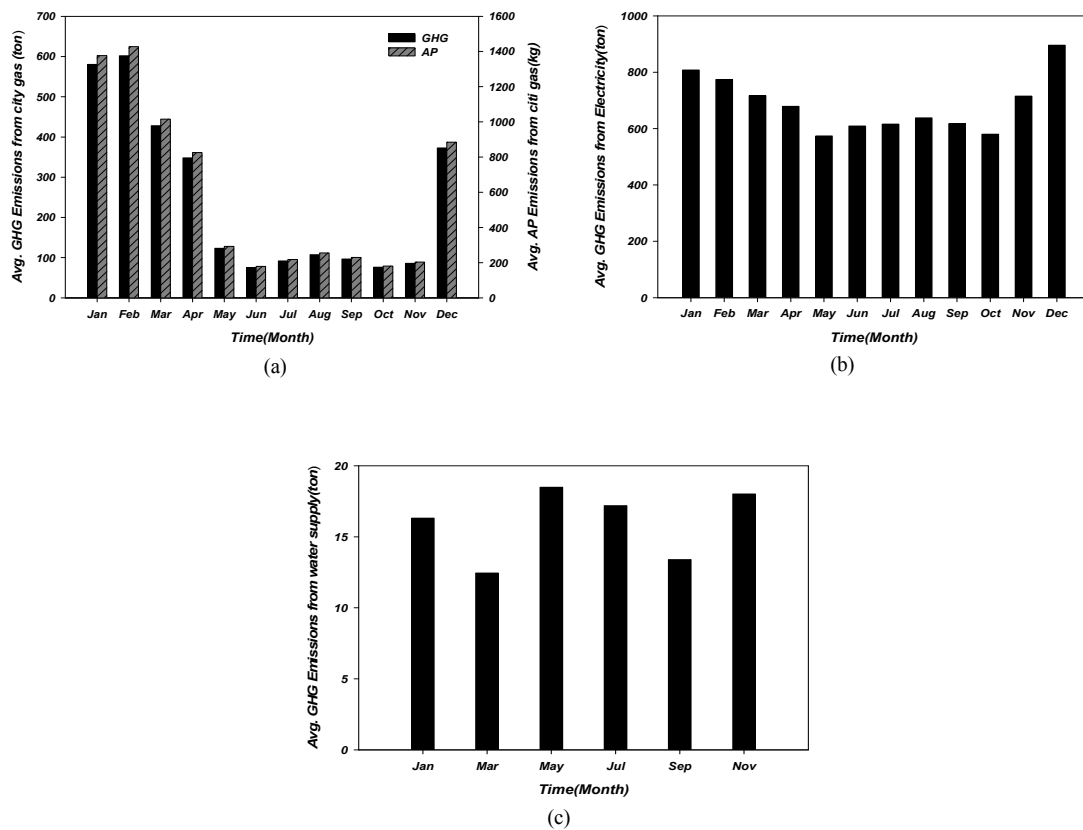


Fig. 3. Monthly averaged GHG and AP integrated emissions from (a) city gas, (b) electricity and (c) water supply in the university from 2010 to 2012.

필요한 것으로 보인다.

Scope 2인 구매전력과 구매상수도 사용량에 의해 발생하는 온실가스 배출량은 각각 8,223.80 tonCO_{2eq}, 95.86 tonCO_{2eq}로 산정되었다. 이는 전체 온실가스 발생량의 각각 72%, 0.84%를 차지하는 수치이며, 이는 대학 내에서 구매전력 사용량에 의한 온실가스 배출량이 다른 항목에 비해 상대적으로 큰 비중을 차지하는 것을 의미한다. Fig. 3b는 월별 구매전력에 의한 온실가스 배출량을 나타내고 있으며, 구매전력은 5월과 10월에 사용량이 가장 적게 나타났으며, 동절기인 겨울철에 가장 많이 사용하는 것으로 나타났다. 이는 도시가스와 유사한 결과로 구매전력의 경우 겨울철 온풍기와 같은 난방 기기를 작동하기 때문이라고 사료된다. Fig. 3c는 월별 구매상수도에 의한 온실가스 배출량을 나타내고 있다. 구매상수도 사용량은 1월부터 12월까지 격월로 사용량에 따라 고지서가 발행되기 때문에 2개월 단위로 구매상수도 사용량에 관해서 온실가스 배출량을 산정하였으며, 구매상수도는 하절기인 여름철과 동절기인 겨울철에 상대적으로 사용량이 많은 것으로 나타났다. 이는 하절기인 여름철 더위로 인한 수도 사용량의 증가와 겨울철 난방 등과 같은 보일러 가동으로 인한 온수 사용량이 증가하기 때문이라고 사료된다.

3.3 에너지원단위 온실가스-대기오염 배출량

에너지원단위 온실가스-대기오염 배출량은 건물 단위면적 및 인원(학생, 교직원, 교원)별로 배출량을 구분

하여 scope 1인 도시가스와 scope 2인 구매전력에 한해서 산정하였다. 도시가스와 구매전력에 의한 건물 단위면적 및 인원별 배출량을 산정하기 위해서 대학 내 건물을 도시가스와 구매전력간의 건물 배출목록을 총 30개로 재분류하였다. Table 6은 도시가스와 구매전력에 의한 대학 건물 단위면적당 및 인원별 온실가스 배출량을 나타낸 것이며, 건물 단위면적당 도시가스와 구매전력에서 발생한 온실가스는 각각 15.4 kgCO_{2eq}/m², 42.4 kgCO_{2eq}로 나타났으며, 이는 선행연구에서 산정한 14.61 kgCO₂/m², 51.3 kgCO₂/m²와 유사한 결과를 보였다(Kim 등, 2012a). 또한 1인당 발생량은 각각 210 kgCO₂/capita, 577 kgCO₂/capita로 나타났으며, 선행연구에서 산정한 241 kgCO₂/capita, 981.86 kgCO₂/capita보다 작은 수치를 보였다(Kim 등, 2012a).

3.4 대체 에너지 사용 시나리오 분석

본 연구의 시나리오 구성 및 분석 결과는 Table 7에 나타내었으며, 2012년도를 기준년도(base year) 및 기준 시나리오(base scenario)로 하여, 연료별 대체에너지 방안 시나리오로 하였다. 감축계획의 수립 시나리오는 포캐스팅(forecasting)과 백캐스팅(backcasting) 방법으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 각각의 연료에 대한 대체 방안 시나리오로 개별적 감축량을 산정 후 이들을 합산이 총 감축량이 되기 때문에 포캐스팅 방법을 이용하였다. 본 연구의 총 시나리오는 4개로 구성하였으며, 시나리오는 다음과 같다. 시나리오 I은 도시가

Table 6. GHG and AP integrated emissions per area (m²) and per capita from 2010 to 2012

Contents	Per area (m ²)					Per capita			
	Categories	Scope				Categories	Scope		
		Unit	Total	City gas	Electricity		Unit	Total	City gas
GHG	CO _{2eq}	ton/m ²	0.0578	0.0154	0.0424	ton/capita	0.786	0.210	0.577
	AP		0.0366	0.0366			0.497	0.497	
	CO		0.0092	0.0092			0.125	0.125	
	NOx		0.0253	0.0253			0.344	0.344	
	SOx		0.0001	0.0001			0.001	0.001	
AP	TSP	kg/m ²	0.0002	0.0002	-	kg/capita	0.003	0.003	-
	PM ₁₀		0.0002	0.0002			0.003	0.003	
	VOCs		0.0012	0.0012			0.017	0.017	
	NH ₃		0.0003	0.0003			0.005	0.005	

스를 투입 에너지로 하는 보일러 운전을 태양열(solar thermal)을 설치하여 대학 내 열에너지를 공급 할 경우의 시나리오이며, 시나리오Ⅱ는 대학 내 공공차량인 이동연소를 전기자동차(Electric Vehicle, EV)와 같은 클린카(clean car)로 대체했을 경우의 시나리오, 시나리오Ⅲ는 전력을 대체할 수 있는 태양광(photovoltaic)을 건물 옥상에 설치하여 사용할 경우이며, 시나리오Ⅳ는 수도사용량을 빗물재이용시스템(rainwater harvesting system)을 이용하여 빗물을 공급할 경우의 시나리오이다. 본 연구의 공통된 가정 조건은 고정비용과 운영비용 등은 적용하지 않았으며, 대체 에너지 효과에 한정하여 오염물질 감축량 및 경제비용을 산정하였다.

시나리오Ⅰ는 대학 내 건물 옥상의 10%를 태양열 시설 설치에 따라 감축되는 도시가스 대비 온실가스-대기오염 통합 오염물질의 양과 이때 발생하는 대체 에너지 경제비용을 분석하였다. 태양열 시설의 설치 면적은 2012년 기준 대학 내 건물 옥상 면적의 10%는 5,588.3 m²이며, 태양열의 환산계수는 2012년 신재생에너지연보에서 제공하는 0.064 toe/m²·yr를 적용하였으며, 이에 따른 연간 열 생산량은 358 toe/yr로 나타났다. 이는 2012년 연간 도시가스 사용량인 1,303 toe의 27%를 대체할 수 있으며, 도시가스 대비 대체 에너지 비용은 연간 약 3억의 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

시나리오Ⅱ는 대학 내 운영되는 휘발유 차량과 디젤 차량 중 디젤 차량을 전기자동차로 모두 변환할 경우 감축되는 온실가스-대기오염 통합 오염물질량과 이때 발생하는 대체 에너지 경제비용을 분석하였다. 전기자동차는 엔진이 없으며 전기를 충전하여 전기 모터만을 이용하여 달리를 자동차이며, 본 연구에서는 전기자동차에 충전에 의한 전력 사용량은 없는 것으로 가정하였다. 이에 따른 오염물질 배출량은 없는 것으로 나타났으며, 디젤 차량에 대한 에너지 대체 비용은 연간 약 5천 6백만원의 절감 효과가 있는 것으로 조사되었다.

시나리오Ⅲ는 전기 생산이 가능한 신재생에너지 부문 중에서 태양광을 대학 내 건물 옥상의 35%를 태양광 시설을 설치 할 경우 전력 대비 감축되는 온실가스의 양과 이때 발생하는 대체 에너지 경제비용을 분석하였다. 2012년 기준 대학 내 건물 옥상 면적의 35%는 19,559 m²으로 이용률은 2012년 신재생에너지 통계연보에서 제공하는 15.5%(자가용 기준)로 하였으며, 전기

생산량은 태양광의 설치 단위 면적당 160 kWh/m²로 가정하였다(Kim, 2013). 배출계수는 전력거래소에서 제공하는 발전단 전력간접배출계수 0.0004428 tonCO_{2eq}/kwh를 이용하여 산정하였다. 이에 따른 연간 전력생산량은 485,063.2 kWh/yr이며, 온실가스 감축량은 214 tonCO₂로 산정되었다. 이는 2012년 전력 사용량에 따른 온실가스 배출량(8,247 tonCO_{2eq})의 2.6%를 대체할 수 있는 것으로 나타났으며, 이에 따른 전력대비 에너지 대체 비용은 약 4천 4백만원의 절감효과가 있는 것으로 조사되었다.

시나리오Ⅳ는 대학 내 건물 옥상의 35%를 빗물 재이용 시스템을 설치하며, 빗물 이용률은 40%로 가정하였다. 강우량은 2012년 서울시 기준 1,646.3 mm로 할 경우 수도사용량 대비 감축되는 온실가스의 양과 이때 발생하는 대체 에너지 비용을 분석하였다. 본 연구에서 이용한 빗물의 온실가스 감축량 원단위는 0.332 tonCO_{2eq}/m³를 이용하였으며(Ministry of Environment, 2011e), 2012년 건물 옥상면적의 35%에 해당하는 연간 집수되는 빗물 이용량은 12,880 ton/yr으로, 2012년 수도사용량 280,494 ton의 약 4.6% 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 따른 수도사용량 대비 에너지 대체 비용은 약 2만원의 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

앞서 분석한 대체 에너지 시나리오를 동시에 시행하게 되면 온실가스는 연간 1,050 tonCO_{2eq}(9.4%), 대기오염물질은 2,499 kgAP(34%)의 감축효과가 있으며, 에너지 대체 비용은 연간 약 4억원(14%)의 절감효과가 있는 것으로 조사되었다. 이는 대체 에너지 시나리오에 따른 총 감축량은 온실가스가 가장 많은 양을 차지하고 있지만, 도시가스와 디젤과 같은 연료 연소에서 발생하는 대기오염물질이 상대적으로 큰 비중을 차지하는 것을 의미하며, 이는 대학의 에너지 정책을 계획하고 실행하는 과정에서 온실가스-대기오염 통합 배출량 감축 및 경제적 측면에서도 매우 중요하다는 것을 보여준다.

3.5 연구의 한계점

대학 내 에너지 사용량에 의한 온실가스-대기오염 통합 산정을 위해서는 온실가스와 대기오염물질 배출량에 관한 배출목록이 우선적으로 작성되어 한다. 이는 연료별 사용량에 따른 배출원인 온실가스와 대기오염물질이 상호 일치성과 활동도를 수집 및 구축함에 있어 가

Table 7. Comparative results of 4 scenarios referenced by base year of 2012

Fuels	Base year			Scenario 1			Scenario 2			Scenario 3			Scenario 4		
	GHG ton	AP kg	Cost 10 ³ won	GHG ton	AP kg	Cost 10 ³ won	GHG ton	AP kg	Cost 10 ³ won	GHG ton	Cost 10 ³ won	GHG ton	Cost 10 ³ won	GHG ton	Cost 10 ³ won
Total	11,206	7,374	2,972,069	10,454	5,571	2,651,082	11,127	6,678	2,915,503	10,992	2,927,186	11,202	2,972,050		
City gas	2,787.0	6,678	1,188,839	2,035.0	4,879	867,852.0	2,787.0	6,678	1,188,839	2,787	1,188,839	2,787.0	1,188,839		
Diesel	79,000	696.0	56,566.0	79,000	696.0	56,566.0	0	0	0	79.00	56,566.00	79,000	56,566.00		
Electricity	8,247.0	-	1,726,251	8,247.0	-	1,726,251	8,247.0	-	1,726,251	8,024	1,681,368	8,247.0	1,726,251		
Water supply	93,000	-	413,000	93,000	-	413,000	93,000	-	413,000	93.00	413,000	89,000	394,000.00		
Emission and cost reductions															
	-752.0	-1,803	-320,987	-79.00	-696	-56,566.0	-79.00	-696	-56,566.0	-214.0	-44,883.0	-4,000	-19,000		

장 중요한 요소가 된다. 즉, 활동도 정보를 구축함에 있어 정확성과 산정 결과의 신뢰성과 관련이 있기 때문이다. 그리고 온실가스와 대기오염물질 통합 배출량을 산정하기 위해서는 에너지원별 산정 목록의 일치성이 요구된다(Shin 등, 2012). 하지만 배출원별 scope 1과 scope 2에 따른 온실가스-대기오염 통합 산정에 있어, scope 1의 경우는 에너지 연소부문으로 고정연소와 이동연소로 구성되어 있어, 온실가스-대기오염 동시 산정이 가능하지만, 외부 에너지를 이용하는 scope 2의 경우에는 온실가스에 한해서 간접배출계수가 존재하여 산정이 가능하지만, 대기오염물질에 관해서는 산정목록이 부재한 실정이다. 이에 활동도를 수집하는 과정에서 중복산정이 되지 않도록 해야 한다. 향후 대학 내 에너지 사용량에 따른 온실가스-대기오염 통합 산정뿐만 아니라 식생, 토양 등에 의한 온실가스 및 대기오염물질의 흡수 또는 배출량 산정에 관한 산정과 기타 대학의 활동에 의해 배출되는 온실가스-대기오염에 관한 온실가스-대기오염 통합 인벤토리가 구축되어야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구는 서울과학기술대학교를 대상으로 에너지 사용량에 따른 온실가스-대기오염 통합 배출량에 관한 통합 인벤토리 구축 및 대체 에너지 사용 시나리오 분석을 통하여 대학 내 에너지 소비구조와 에너지 배출원별 특성을 분석하였다. 서울과학기술대학교 내 에너지 사용량에 따른 온실가스-대기오염 통합 산정 및 시나리오 분석 결과는 다음과 같다.

1) 대학 내 에너지 사용 비중은 구매전력이 약 73%로 가장 컸으며, 다음으로 도시가스가 약 26%로 나타났다. 2010~2012년 연간 배출된 평균 온실가스 양은 11,420 tonCO_{2eq}이었으며, 대기오염물질은 7,755 kgAP으로 산정되었다. 통합 배출량 산정결과 2010년 대비 2012년에는 온실가스 및 대기오염물질 발생량이 각각 약 4.5%, 9.7% 저감되었다.

2) 대학 내 scope 1에서 배출된 온실가스 및 대기오염물질은 각각 3,101 tonCO_{2eq}, 7,757 kgAP으로 산정되었으며, scope 2에서 배출된 온실가스는 연간 8,319 tonCO_{2eq}으로 나타났다.

3) 도시가스와 구매전력에서 배출된 온실가스가 전체의 98.2%의 비율을 차지하고 있으며, 구매전력은 도시가스에 비하여 약 2.7배 높은 배출량을 보였다. 그리고 대기오염물질은 도시가스에서 전체 배출량의 91%를 차지하고 있으며, 이 중 NO_x가 전체 발생량의 68.55%, 다음으로 CO가 25.32%로 차지하는 것으로 나타났다.

4) 건물 에너지 사용에 따른 단위면적당 도시가스와 구매전력에서 발생한 온실가스는 각각 15.4 kgCO_{2eq}/m², 42.4 kgCO_{2eq}로 나타났으며, 1인당 발생량은 각각 210 kgCO₂/capita, 577 kgCO₂/capita로 분석되었다.

5) 대체 에너지 시나리오 분석결과 연간 온실가스와 대기오염물질 감축량은 각각 1,050 tonCO_{2eq}(9.4%), 2,499 kgAP(34%)로 나타났으며, 절감 비용은 약 4억원(14%)으로 분석되었다.

6) 본 연구의 한계점은 온실가스-대기오염의 동일한 배출목록 작성과 정확한 활동도 자료 수집의 어려움이다. 이에 따라 배출량 동시 산정 시 신뢰성과 정확도에 관한 체계적인 정도관리(QA/QC)가 수행되어야 한다. 본 연구를 바탕으로 향후 대학 내 에너지사용량 뿐만 아니라 토지이용, 출장 및 출퇴근 등과 같은 부문까지 확대해서 적용한다면 보다 정확한 온실가스-대기오염 통합 배출량 산정이 이루어 질 것이다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 : 2014-1458).

참고문헌

- ACUPCC (American College and University Presidents' Climate Commitment), 2007, <http://presidentsclimatecommitment.org/>.
- EEA (European Environment Agency), 2013, EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013, EU.
- GRI (Gyeonggi Research Institute), 2010, Development of green campus practice manual and campus GHG inventory model.
- IEA (International Energy Agency), 2012, 2012 Key world energy statistics, IEA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006,

- 2006 IPCC guideline for national greenhouse gas inventories, IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, Climate change 2007, IPCC.
- Kim, J. S., Lee, K. B., Lee, I. H., Kim, S. D., 2012a, Analysis of energy consumption pattern and greenhouse gas emission in the academic facility, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 34(9), 604-612.
- Kim, M. S., 2013, Annual energy yield prediction of building added PV system depending on the installation angle in Korea, M. D. Thesis, Hanbat National University, Deajeon, Korea.
- Kim, K. D., Ko, H. K., Lee, T. J., Kim, D. S., 2011, Comparison of greenhouse gas emissions from road transportation of local government by calculation methods, J. KOSAE, 27(4), 405-415.
- Kim, K. D., Lee, T. J., Jung, W. S., Kim, D. S., 2012b, Development of traffic volume estimation system in main and branch roads to estimate greenhouse gas emissions in road transportation category, J. KOSAE, 28(3), 233-248.
- Korean Association for Green Campus Initiative, 2012, <http://www.kagci.org/>.
- Korea Environment Corporation, 2012, Guidelines for local government greenhouse gas inventories(ver.3.0).
- Korea Energy Management Corporation, 2012, <http://www.kemco.or.kr/>.
- Korea Power Exchange, 2012, <http://www.kpx.or.kr/>.
- Lee, T. J., Kim, K. D., Jung, W. S., Kim, D. S., 2012, Comparison of greenhouse gas emissions from road transportation in local cities/countries of Gyeonggi province by calculation methodologies, J. KOSAE, 28(4), 454-465.
- Ministry of Environment, 2011a, Development of greenhouse gas (GHG) mitigation model for university.
- Ministry of Environment, 2011b, GHG and energy target management system.
- Ministry of Environment, 2011c, GHG and energy target management system in public sector.
- Ministry of Environment, 2011d, Guidelines for greenhouse gases emission inventory for university.
- Ministry of Environment, 2011e, Guidelines for greenhouse gases reduction plans for university.
- NIER (National Institute of Environment Research), 2010 assessment manual of national air pollutant emission inventory(Ⅱ).
- Park, S. Y., Han, Y. J., Oh, A. R., Lee, W. K., 2012, Development of greenhouse gas (GHG) emissions inventory and evaluation of GHG reduction plans of Kangwon National University, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 34(1), 32-41.
- Seoul National University of Science and Technology, 2010-2012 year book, Seoul.
- Shin, E. S., Jung, H. J., Yi, S. M., 2012, Development of the guideline for university on GHG emission inventory, J. KOSAE, 28(3), 316-324.
- Song, C. K., Lee, S. K., Yoon, J. S., 2011, A review of the integrated strategy for climate change and air pollution management, J. KOSAE, 27(6), 805-818.
- University of California, Berkeley, 2008, UC Berkeley 2007 and 2008 verified greenhouse gas emissions inventory summary, <http://re.acupcc.org/>.
- University of Louisville, 2009, University of Louisville baseline inventory of greenhouse gas emissions fiscal years 2006-2008, <http://rs.acupcc.org/>.
- University of Miami, 2008, Greenhouse gas inventory 2002-2007, <http://re.acupcc.org/>.
- WRI (World Resources Institute), 2001, The greenhouse gas protocol : a corporate accounting and reporting standard, WRI.