

서울시 식생부문 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량 인벤토리 및 환경가치분석

GHG-AP Integrated Sink/Emission Inventories and Environmental Value Analysis in Vegetation Sector of Seoul

정재형 · 권오열^{1)*}

서울과학기술대학교 에너지환경공학과, ¹⁾서울과학기술대학교 환경공학과
(2014년 7월 21일 접수, 2014년 9월 16일 수정, 2015년 1월 21일 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 21 July 2014, revised 16 September 2014, accepted 21 January 2015)

Abstract

We constructed greenhouse gas (GHG) and air pollution (AP) integrated sink/emission inventories and evaluated the environmental value for the vegetation sector in Seoul during year 2010. The data of vegetation, classified into four sectors of cultivated land, forest land, park and street tree, were obtained from Statistics Korea and Seoul City. Based on the previous studies, only CO₂ was chosen as GHG sink by vegetation. NO₂ and SO₂ were chosen as AP sink by vegetation, while isoprene, monoterpene, other VOC (OVOC) and NH₃ were chosen as AP emission from vegetation. Estimation methodology and sink/emission factors were gathered from reports and published literatures. Estimated GHG sink by vegetation during year 2010 was 12,987,173 tonCO_{2eq}, of which approximately 1/4 was from pure vegetation and the remaining 3/4 from vegetation soil. AP sink and emission were estimated to be 23,309 tonAP and 2,629,797 tonAP, respectively. The analysis by administrative districts in Seoul revealed that among 25 districts, Seocho-gu, Nowon-gu, Eunpyeong-gu, Gwanak-gu and Gangbuk-gu were the major districts in GHG and AP sink/emission inventories for vegetation sector. Environmental value of vegetation as a function of GHG and AP sink, was estimated as 800 billion won, corresponding to 5% of the total cost of the forest land in Korea evaluated as a public function.

Key words : Vegetation, Greenhouse gas (GHG), Air pollution (AP), Sink, Emission, Environmental value

*Corresponding author.

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

1. 서 론

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서 RCP 8.5 시나리오에 따르면 21세기 말 지구의 평균 기온은 1986~2005년 대비 평균 3.7 °C 상승할 것으로 예상하고 있다(IPCC, 2013). 대기 중 온실가스는 산업화 이후 1차적으로는 화석연료 사용으로 인한 배출과 2차적으로는 토지이용변화로 인한 배출로 인간의 인위적 활동에 의해 점점 증가하여서, 2011년에는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)의 농도가 각각 391 ppm, 1,803 ppb, 324 ppb로 산업화 이전보다(1750년 기준) 약 40%, 150%, 20% 증가하였다(IPCC, 2013). 특히, 우리나라는 2013년 기준 대기 중 CO₂의 농도가 400 ppm을 상회하는 것으로 보고되고 있다(CCIC, 2013). 또한 우리나라 도심지 대기오염의 경우 일산화탄소(CO)와 같은 1차 대기오염물질의 농도는 점점 감소 형태를 보이지만, 오존(O₃)과 같은 2차 대기오염물질의 농도는 증가하는 추세를 보이고 있다(Kim *et al.*, 2013).

온실가스와 대기오염물질은 다양한 발생원으로부터 대기 중으로 배출되며 그 중에서 식생은 대기 중 존재하는 CO₂의 탄소상쇄(carbon offset)에 따른 탄소순환(carbon cycle) 등의 중요한 역할 담당을 하고 있으며, 대기오염 측면에서도 중요한 가치를 지니고 있다(Yoo *et al.*, 2011).

현재 식생에 의한 탄소저장량(carbon storage) 추정 등과 같은 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 식생에 관한 국·내외 선행연구의 예를 살펴보면 다음과 같다. Deng *et al.* (2011)은 GIS(Geographical Information System)를 기반으로 산림의 탄소 흡수 및 저장량을 정량적으로 분석하였으며, 이를 이용하여 경제학적 관점에서 접근하였다. Peltoniemi *et al.* (2006)은 산림 토양 및 식생의 탄소 흡수 및 저장량의 불확실도에 관한 요인을 분석하였으며, Zhang *et al.* (2013)은 탄소 배출과 흡수원에 대해서 토지이용과 수송의 영향도를 분석하였다. 국내에서도 식생에 의한 탄소 저장량 및 감축방법에 관한 연구가 진행되었으며(SDI, 2010; GRI, 2009), 토지의 이용변화에 따른 식생과 토양의 이산화탄소 저감잠재량을 분석한 사례가 있다(Lee *et al.*, 2009). 하지만 국·내외 선행연구는 탄소의 흡수/저장량에 집중되어 연구가 진행되고 있으며, 산정의

기초가 되는 활동도 연구 또한 일부에 한정되어 진행되고 있다.

따라서 식생에 의한 탄소저장량 뿐만 아니라 대기 오염 흡수/배출량 산정에 관한 통합 연구가 필요하며, 온실가스-대기오염 흡수/배출원으로써의 평가를 위해 식생에 의한 온실가스-대기오염 통합 인벤토리 구축과 이를 바탕으로 하는 가치분석이 필요하다. 최근 연구에서 기후변화와 대기환경에 대한 통합적 관리에 대한 연구의 필요성을 언급했지만, 화석연료와 같은 에너지 사용과 정책적 대안을 중심으로 연구가 진행되고 있다(Song *et al.*, 2011). 이에 대기 중으로 배출되는 오염물질의 발생원뿐만 아니라 흡수원에 관한 연구도 필요하며, 순수 식생과 식생토양부문 등의 세부 활동도의 적용과 온실가스-대기오염을 동시에 산정하는 통합 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 2010년 서울시를 대상으로 식생 부문 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량 인벤토리를 구축하며, 이를 바탕으로 산정의 정량화를 위한 식생원단위분석과 경제성 평가를 위한 환경가치분석을 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구의 범위

본 연구의 공간적 범위는 서울시이며, 시간적 범위는 2010년을 대상으로 하였다. 내용적 범위는 서울시 식생현황을 조사하고 이를 토대로 식생 부문 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출원으로써의 기능을 분석하였다. 식생활동도는 국가 통계자료에서 자료를 추출 및 구축하는 하향식접근법(Top-Down Approach, TDA)을 이용하였으며, 표 1에 식생활동도를 제시하였다(Seoul City, 2011).

2.2 연구 대상물질

본 연구의 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량 산정에서 온실가스는 흡수원으로만 고려하였으며, 대기오염 흡수원은 이산화질소(NO₂)와 이산화황(SO₂), 그리고 배출원은 휘발성유기화합물류(Volatile Organic Compounds, VOCs)를 대상으로 하였다. 다시 설명하면, 온실가스와 대기오염 흡수량은 IPCC (2006) 가이드라인에서 제시하는 CO₂와 SDI(Seoul Develop-

Table 1. Status of vegetation activities in Seoul, 2010.

Type of vegetation		Unit	Area	Ratio of Seoul (%)
Cultivated land	Rice paddy		3,180	5
	Dry paddy		6,120	10
	Sub-total		9,300	15
Forest	Conifer		13,700	2.26
	Non-conifer		74,240	12.27
	Mixed		48,630	8.03
	Forest land without trees		20,620	3.41
	Sub-total		157,190	25.97
Park	Natural	1,000 m ²	39,448	6.52
	Children's		2,174.4	0.36
	Small		358.9	0.06
	Neighborhood		43,221.4	7.14
	Urban natural		65,548.4	10.83
	Cemetery		2,377.9	0.39
	Cultural		356.1	0.06
	Sports		66.3	0.01
	Historic		334.5	0.06
	Riverside		36.0	0.01
	Others		15,870.4	2.62
	Sub-total		169,792.3	28.05
	Total			336,282.3
Street trees		Trees	283,609	-

ment Institute, 2010) 등의 선행연구를 바탕으로 NO₂와 SO₂을 대상으로 산정하였으며 (SDI, 2010; IPCC, 2006), 대기오염 배출량은 EEA (European Environment Agency, 2013)과 NIER (National Institute of Environment Research, 2013, 2010)에서 제시하는 물질로써 VOCs에 포함되는 이소프렌 (isoprene), 모노테르펜 (monoterpene), 기타 휘발성유기화합물 (Other Volatile Organic Compound, OVOC) 및 암모니아 (NH₃)를 대상으로 산정하였다.

식생부문 배출물질은 생물기원 휘발성유기화합물류 (Biogenic Volatile Organic Compounds, BVOCs)이며, 본 연구의 산정 대상물질인 테르펜 (terpene)은 C₁₀H₁₆의 일반식으로 표현되는 불포화 탄화수소로써 isoprene 단위를 2개 가지고 있는 물질이기 때문에 또한 헤미테르펜 (hemiterpene)이라한다. OVOC는 식생에서 배출되는 isoprene과 monoterpene을 제외한 비메탄 휘발성유기화합물 (Non-Methane Volatile Organic Compounds, NMVOCs)과 산화/비산화된 휘발성유기화합물 (Oxygenated or Non-Oxygenated VOCs)을 포함하는 물질이다 (EEA, 2013; NIER, 2013, 2010).

2.3 흡수/배출계수

본 연구에 이용된 흡수/배출계수는 IPCC (2006) 가이드라인과 GRI (Gyeonggi Research Institute, 2009)에서 발행한 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안, SDI (2010)에서 발행한 공원녹지분야의 탄소흡수원 확보 및 탄소저감방안 그리고 NIER (2013, 2010)에서 발행한 대기오염산정방법편람과 선행연구에서 개발한 흡수/배출계수를 선정 및 추출하여 적용하였으며 (EEA, 2013; NIER, 2013, 2010; KEC, 2012; SDI, 2010; GRI, 2009; IPCC, 2006; Lee, 2003, 2001), 표 2에 본 연구에 적용한 흡수/배출계수를 정리 및 제시하였다. 본 연구에서 산림/공원부문 혼효림의 NO₂와 SO₂ 흡수계수는 침엽수림과 활엽수림 흡수계수의 평균값을 적용하였다.

2.4 산정방법

식생에 의한 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량 산정방법은 경작토양, 산림, 공원의 각 부문별 면적과 배출계수의 곱으로 산정되며, 식 (1)로 표현된다.

$$S \text{ 또는 } E = A \times EF \quad (1)$$

Table 2. GHG-AP integrated sink and emission factors in vegetation sector used in this study.

Type of vegetation		Sink (-)				Source	Emission (+)				Source
		CO _{2eq}	Soil CO _{2eq}	NO ₂	SO ₂		Isoprene	Monoterpene	OVOC	NH ₃	
Unit		tC/ yr · ha	tC/ yr · ha	kg/ yr · ha	kg/ yr · ha	kg/km ² · hr					
Cultivated land	Rice	-	60.5	-	-	Lee (2001)	0.102	0.255	0.0153	-	
	Dry	-	45.9	-	-		0.01	0.024	0.193	-	
Forest	Conifer	41.4	67.9	240	120		0.0793	2.1001	1.2965	0.0762	
	Non-conifer	41.4	67.9	690	360	Lee (2001)	0.0431	0.0374	0.694	0.0762	EEA (2013)
	Mixed	41.4	67.9	465	240	SDI (2010)	0.0431	0.0374	0.694	0.0762	NIER (2013)
	Without trees	-	67.9	-	-		-	-	-	-	NIER (2010)
Park	Conifer	17.3	92	240	120	Lee (2003)	0.0431	0.0374	0.694	0.0762	
	Non	17.3	92	690	360	SDI (2010)	0.0431	0.0374	0.694	0.0762	
	Mixed	17.3	92	465	240	SDI (2010)	0.0431	0.0374	0.694	0.0762	
Unit		kgCO ₂ /tree/yr	-	-	-	-	-	-	-	-	
Street trees	Ginkgo	35.4	-	-	-		-	-	-	-	
	Platanus	55.6	-	-	-		-	-	-	-	
	Zelkova	33.7	-	-	-		-	-	-	-	
	Prunus	26.9	-	-	-	GRI (2009)	-	-	-	-	
	Pine	7.3	-	-	-	SDI (2010)	-	-	-	-	
	Metasequoia	69.6	-	-	-		-	-	-	-	
	Sophora	32.5	-	-	-		-	-	-	-	
	Others	173 kgC/tree	-	-	-		-	-	-	-	

여기서, S는 온실가스 또는 대기오염 흡수량 (ton/yr), E는 온실가스 또는 대기오염 배출량 (ton/yr), A는 활동도 (km²), EF는 흡수 또는 배출계수 (ton/yr · km²)이다 (EEA, 2013; NIER, 2013; KEC 2012; SDI, 2010; GRI, 2009; IPCC, 2006).

또한 식생부문 중 가로수는 온실가스 흡수원만 고려하며, 가로수 수종과 배출계수의 곱으로 산정된다. 가로수에 의한 온실가스 흡수량은 식 (2)로 표현된다.

$$S = A \times EF \tag{2}$$

여기서, S는 가로수에 의한 온실가스 흡수량 (ton), A는 활동도 (trees), EF는 흡수계수 (ton/tree/yr)이다 (KEC, 2012; SDI, 2010; GRI, 2009; IPCC, 2006).

3. 결 과

3. 1 식생부문 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량

2010년 서울시 식생부문을 경작토양, 산림, 공원, 가로수, 식생토양으로 구분하여 온실가스-대기오염 통합

흡수/배출량을 산정하였으며, 표 3에 산정결과를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 식생부문 흡수된 온실 가스는 12,987,573 tonCO_{2eq}으로 산정되었으며, 순수한 식생과 식생토양에 의한 흡수량은 각각 3,172,866 tonCO_{2eq}, 9,814,707 tonCO_{2eq}으로 식생토양은 순수한 식생의 온실가스 흡수량 대비 약 3배 많은 것으로 나타났다. 그리고 대기오염 흡수/배출량은 각각 23,309 tonAP, 2,629,797 tonAP로 산정되었으며, 본 연구에서 tonAP는 대기오염 배출량 (Air Pollution, AP)으로 정의하였다.

부문별로 살펴보면, 온실가스 흡수량은 산림이 2,073,132 tonCO_{2eq}로 가장 많았으며, 다음으로 공원이 1,077,447 tonCO_{2eq}로 산림 대비 51.95%를 차지하는 것으로 나타났다. 하지만 산림토양에 의한 온실 가스 흡수량은 산림이 3,913,507 tonCO_{2eq}, 공원은 5,727,657 tonCO_{2eq}로써 공원이 산림 대비 많은 흡수량을 보였다. 이는 서울시가 지속적인 주변 공원녹지 확충사업을 진행한 결과로 2009년 기준 WHO (World Health Organization)가 권고하는 1인당 공원면적이 9 m²를 상회하고 (WHO, 2009), 국토해양부에서 권고하는 1인당 6 m²를 충족하고 있다 (MLTM, 2009).

Table 3. GHG-AP integrated sink and emission from vegetation sector in Seoul.

Type of vegetation	Sink (-)										Emission (+)					(unit: ton)
	Total	CO ₂ eq	Soil CO ₂ eq	AP-S ^(a)	NO ₂	SO ₂	AP-E ^(b)	Isoprene	Monoterpene	OVOc	NH ₃					
	12,987,573	3,172,866	9,814,707	23,309	15,610	7,699	2,629,797	123,393	356,310	1,945,594	204,500					
Cultivated land	173,543	-	173,543	-	-	-	22,541	3,378	8,390	10,773	-					
Rice	70,543	-	70,543	-	-	-	10,371	2,841	7,103	426	-					
Dry	103,000	-	103,000	-	-	-	12,170	536	1,287	10,347	-					
Forest	5,986,639	2,073,132	3,913,507	11,717	7,713	4,004	1,341,938	55,908	292,291	902,577	91,162					
Conifer	549,050	207,966	341,084	493	329	164	426,295	9,517	252,037	155,596	9,145					
Non-conifer	2,975,292	1,126,963	1,848,329	7,796	5,123	2,673	553,156	28,030	24,232	451,338	49,556					
Mixed	1,948,928	738,203	1,210,725	3,428	2,261	1,167	362,397	18,361	15,932	295,643	32,461					
Without trees	513,369	-	513,369	-	-	-	-	-	-	-	-					
Park	6,805,104	1,077,447	5,727,657	11,592	7,897	3,695	1,265,318	64,107	55,629	1,032,244	113,338					
Natural	1,580,945	250,232	1,330,713	2,781	1,834	947	293,972	14,894	12,924	239,822	26,332					
Children's	87,135	13,792	73,343	153	101	52	16,202	821	712	13,218	1,451					
Small	14,782	2,675	12,107	26	17	9	2,676	136	118	2,182	240					
Neighborhood	1,732,173	274,168	1,458,005	3,047	2,010	1,037	322,093	16,319	14,160	262,763	28,851					
Urban	2,626,961	415,795	2,211,166	4,621	3,048	1,573	488,475	24,748	21,475	398,498	43,754					
Cemetery	95,294	15,083	80,211	168	111	57	17,720	898	779	14,456	1,587					
Cultural	14,271	2,259	12,012	26	17	9	2,654	134	117	2,165	238					
Sports	2,658	421	2,237	5	3	2	494	25	22	403	44					
Historic	13,406	2,122	11,284	24	16	8	2,493	126	110	2,034	223					
Riverside	1,442	228	1,214	3	2	1	269	14	12	219	24					
Others	636,037	100,672	535,365	738	738	0.007	118,270	5,992	5,200	96,484	10,594					
Street trees	22,287	22,287	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Ginkgo	4,056	4,056	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Platanus	4,417	4,417	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Zelkova	1,008	1,008	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Prunus	609	609	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Pine	29	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Metasequoia	400	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Sophora	293	293	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Others	11,475	11,475	-	-	-	-	-	-	-	-	-					

^(a) Air Pollution Sink (AP-S=NO₂+SO₂), ^(b) Air Pollution Emission (AP-E=isoprene+monoterpene+OVOc+NH₃).

식생부문별 대기오염 흡수량은 공원과 산림이 각각 11,592 tonAP, 11,717 tonAP로 유사한 수준으로 산정되었으며, NO₂가 SO₂에 비하여 약 52% 높은 흡수량을 보였다. 또한 산림에 의한 대기오염 배출량은 1,341,938 tonAP로 가장 많은 배출량을 보였으며, 공원은 1,265,318 tonAP로 산림과 유사한 수준에서 산정되었다. 식생부문별 세부분석은 3.2절에 제시하였다.

3.2 부문별 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량

식생부문별 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량 산정결과는 그림 1에 제시하였다. 경작토양은 서울시 내 경작되어지는 논과 밭으로, 온실가스 흡수량은 173,543 tonCO_{2eq}로 산정되었으며, 대기오염 배출량은 22,541 tonAP로 나타났다. 부문별로는 논과 밭에 의한 온실가스 흡수량은 각각 70,543 tonCO_{2eq} (40.65%), 103,000 tonCO_{2eq} (59.35%)로 나타났으며, 대기오염 배출량은 10,371 tonAP (46%), 12,170 tonAP (54%)로 각각 산정되었다.

산림에 의한 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량은 순수한 식생에 의한 흡수/배출량, 식생토양에 의한 흡수량을 합산하였다. 산정결과 순수한 활엽수림에 의한 온실가스 흡수량은 1,126,963 tonCO_{2eq}로 54.36%의 비율을 차지하였으며, 혼효림은 738,203 tonCO_{2eq}로 35.6%의 비율을 차지하였다. 이는 순수식생에 의한 온실가스 흡수량은 활엽수림이 침엽수림에 비하여 흡수 능력이 큰 것을 의미한다. 산림토양에 의한 온실가스 흡수량도 식생부문과 동일한 경향성으로 활엽수림이 1,848,329 tonCO_{2eq}로 가장 많은 온실가스 흡수량을 보였으며, 다음으로 혼효림이 1,210,725 tonCO_{2eq}로 나타났다. 식생토양은 무림지 토양에 의한 온실가스 흡수량이 포함되며 무림지에 의한 온실가스 흡수량은 513,369 tonCO_{2eq}로 침엽수림에 의한 341,084 tonCO_{2eq}보다 많은 흡수량을 보였다. 산림에 의한 대기오염 흡수량도 온실가스와 동일한 경향성을 보였으며, 활엽수림에 의한 흡수량이 7,796 tonAP로 66.43%의 비율을 차지하였으며, 다음으로 혼효림이 3,428 tonAP로 나타났다. 산림에 의한 대기오염 발생량은 활엽수림에서 553,156 tonAP로 가장 많은 배출량을 보였으며, 다음으로 침엽수림에서 426,295 tonAP로 산정되었다. 이는 온실가스 흡수량과 다른

경향성으로 침엽수림의 경우 휘발성유기화합물 계열의 물질이 활엽수림에 대비하여 많이 배출하기 때문으로 분석되었다. 대기오염물질별로는 모노테르펜의 경우 침엽수림에 의해 배출된 양은 연간 252,037 ton으로 총 발생량의 86.23%의 비율을 차지하고 있으며, 이 외의 대기오염 배출물질인 이소프렌, 기타 휘발성유기화합물, 암모니아는 활엽수림에서 많은 배출량을 보였다.

공원에 의한 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량도 산림에서 적용한 방법을 동일하게 적용하여 순수한 식생에 의한 흡수/배출량과 식생토양에 의한 흡수량을 각각 합산 후 산정하였다. 산정결과 온실가스 흡수량은 도시자연공원이 415,795 tonCO_{2eq}로 가장 많은 흡수량을 보였으며, 다음으로 자연공원과 근린공원이 각각 250,232 tonCO_{2eq}, 247,168 tonCO_{2eq}로 유사한 수준에서 산정되었다. 공원토양에 의한 온실가스 흡수량도 식생에 의한 경향성과 유사하게 나타났으며, 도시자연공원 토양에 의한 온실가스 흡수량이 가장 많았지만, 공원식생에 의한 온실가스 흡수량과 다르게 근린공원에 의한 토양이 자연공원 토양에 의한 온실가스 흡수량보다 많은 것으로 나타났다. 공원에 의한 대기오염 흡수량도 온실가스와 동일한 경향성을 보였으며, 도시자연공원이 4,621 tonAP, 그리고 근린공원과 자연공원이 각각 3,048 tonAP, 2,781 tonAP로 산정되었다. 대기오염 배출량도 온실가스 흡수량과 유사한 경향성을 보였으며, 도시자연공원에 의한 대기오염 배출량은 488,475 tonAP로 가장 많은 배출량을 보였고, 근린공원과 자연공원이 각각 322,093 tonAP, 293,972 tonAP로 산정되었다. 본 연구에서 토양에 의한 온실가스 흡수량은 토양의 이화학적 특성이 고려되지 않았기 때문에 산정에 대한 한계성을 지니고 있으며, 향후 보다 정확한 산정을 위해서는 식생토양 별 이화학적 특성을 고려하여 산정해야 할 것으로 사료된다.

가로수는 수종별 온실가스 흡수량에 한해서 산정하였으며, 산정결과 기타 수종을 제외하고 가로수 단일 수종으로 버즘나무 (platanus)가 4,417 tonCO_{2eq} (19.82%)로 가장 많은 온실가스 흡수량을 보였으며, 다음으로 은행나무 (ginkgo)가 4,056 tonCO_{2eq} (18.20%)로 산정되었다. 반면 가장 작은 흡수량을 보인 수종은 소나무 (pine)로 연간 29 tonCO_{2eq} (0.13%)로 나타났다.

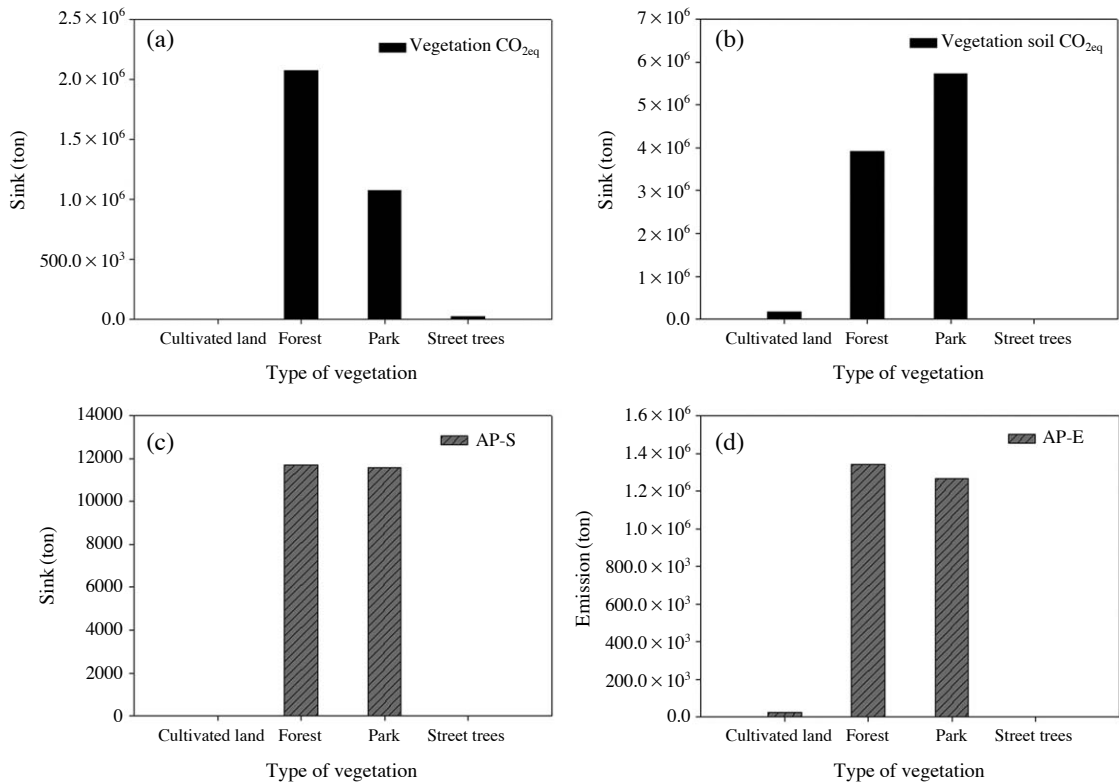


Fig. 1. Total GHG-AP integrated sinks and emissions for vegetation types; (a) GHG sinks by vegetation, (b) GHG sinks by vegetation soil, (c) AP sinks by vegetation, (d) AP emissions from vegetation.

3.3 행정구역별 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량 및 원단위분석

그림 2는 서울시 식생부문 행정구역별 온실가스-대기오염 흡수/배출량과 원단위 분석결과를 나타내고 있다. 행정구역별 흡수/배출량은 산림, 공원 및 가로수를 대상으로 산정하였으며, 경작토양은 행정구역별 자료가 부재하여 제외하였다. 그림에서 보는 바와 같이 온실가스 흡수량은 서초구가 1,280,719 tonCO_{2eq}로 가장 많은 흡수량을 보였으며, 다음으로 노원구, 은평구, 관악구, 강북구 순으로 나타났다. 대기오염 흡수/배출량은 경작토양과 가로수는 행정구역별 자료가 부재하여 산림과 공원을 대상으로 산정하였으며, 이에 따른 흡수/배출량은 각각 23,687 tonAP, 2,607,251 tonAP로 나타났다. 행정구역별 대기오염 흡수량은 서초구가 2,560 tonAP로 가장 많은 흡수량을 보였으며,

노원구 (2,207 tonAP), 은평구 (2,115 tonAP), 관악구 (2,038 tonAP) 순으로 나타났다. 그리고 배출량은 관악구가 319,775 tonAP로 가장 많은 배출량을 보였으며, 서초구 (275,928 tonAP), 노원구 (224,541 tonAP), 은평구 (210,690 tonAP) 순으로 높은 것으로 나타났다. 원단위분석은 행정구역별 흡수/배출량 산정값을 합산한 후 행정구역별 면적으로 나누어 산정하였다. 산정결과 면적당 온실가스 흡수량은 3,683~44,569 tonCO_{2eq}/km²으로 나타났으며, 대기오염 흡수/배출량은 각각 6~83 tonAP/km², 713~10,814 tonAP/km²으로 조사되었다. 행정구역별 면적당 온실가스 흡수량은 강북구가 44,569 tonCO_{2eq}/km²으로 가장 많은 흡수량을 보였으며, 은평구 (39,557 tonCO_{2eq}/km²), 관악구 (38,540 tonCO_{2eq}/km²), 노원구 (34,503 tonCO_{2eq}/km²) 순으로 높은 흡수량을 보였다. 또한 대기오염 흡수량은 강북구 (83 tonAP/km²), 도봉구 (78 tonAP/km²), 은

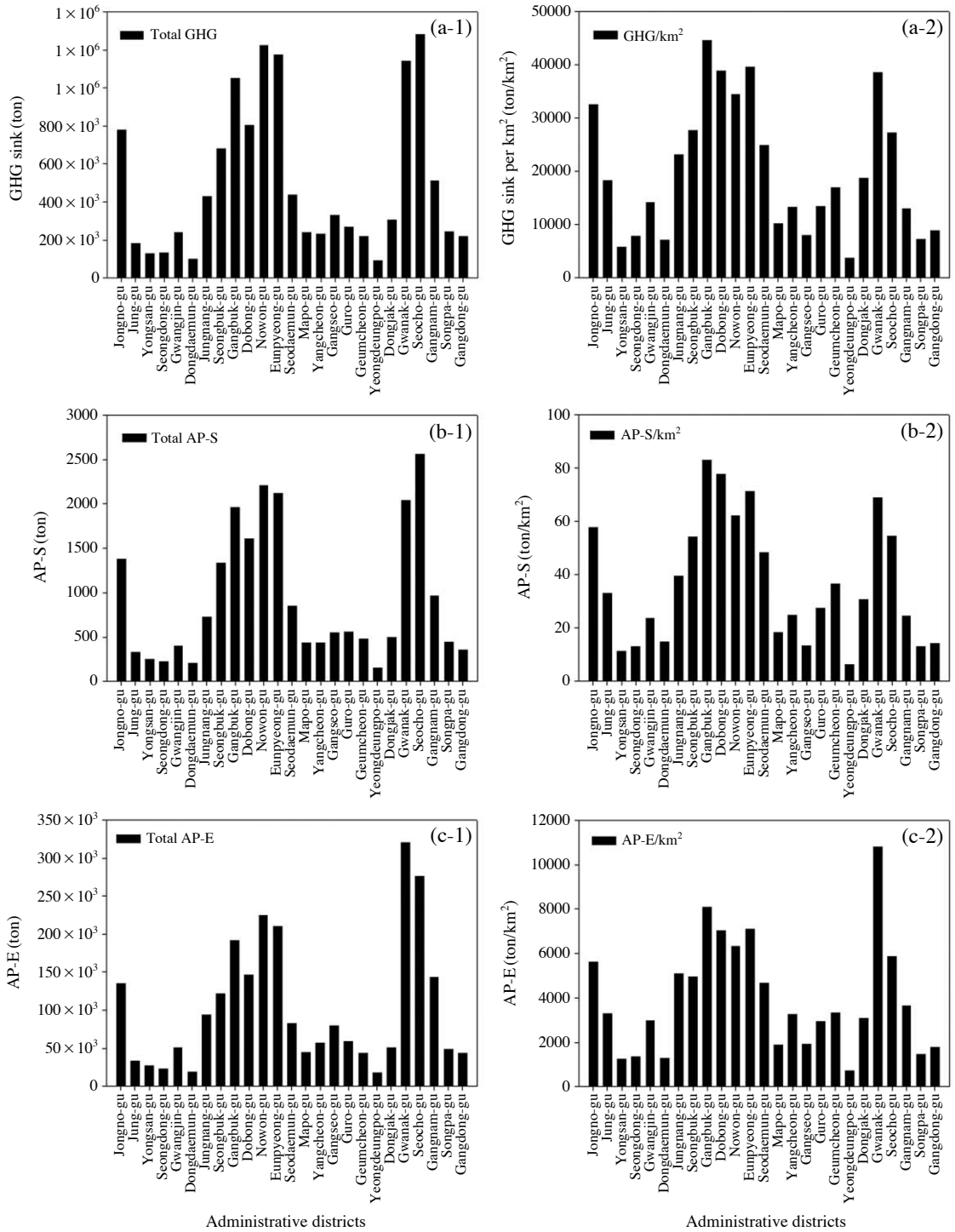


Fig. 2. GHG-AP integrated sinks and emissions by administrative districts in vegetation sector; (a-1) GHG sink, (a-2) GHG sink/km², (b-1) AP-S, (b-2) AP-S/km², (c-1) AP-E, (c-2) AP-E/km².

평구 (71 tonAP/km²), 관악구 (69 tonAP/km²), 노원구 (62 tonAP/km²) 순으로 높게 나타났으며, 배출량은 관악구가 10,814 tonAP/km²으로 가장 많은 배출량을 보였으며, 강북구 (8,104 tonAP/km²), 은평구 (7,096 tonAP/km²), 도봉구 (7,046 tonAP/km²), 노원구 (6,336 tonAP/km²) 순으로 나타났다.

식생부문 흡수/배출원단위분석은 탄소상쇄와 대기오염 제어를 위한 가치로써 평가할 수 있다. 이는 신뢰성 있고 정확한 온실가스-대기오염 통합 배출량 산정과 이에 따른 감축량 차이를 정량화하여 식생의 흡수량을 이용한 환경가치분석이 가능하며, 본 연구 3.4절에서 자세히 분석하였다.

3.4 온실가스-대기오염 통합 흡수량에 따른 환경가치분석

서울시 식생부문 온실가스-대기오염 통합 흡수량에 따른 환경가치분석 결과를 표 5에 나타내었다. 환경가치분석은 환경편익 (environmental benefit) 방법을 이용하였으며, 환경편익은 간접방법과 직접방법으로 구분된다. 전자는 금전적 가치로 환산, 후자는 가상적 상황을 설정한 환경의 가치를 평가하는 방법이다. 본 연구는 환경편익 계량화 방법 중 간접방법을 이용하였으며, 적용방법은 식생에 의해 저감되는 온실가스-대기오염 통합 흡수량을 이용한 환경 변화를 금전적 가치로 환산한 사회적 비용 (social cost)으로 분석하였다. 특히, 환경적 기능을 화폐적 가치로 환산하는 가치평가방법이 적절하지 않은 경우에는 과소 또는 과대평가가 될 수 있어 주의해야 한다. 산림의 대기정화량을 경제적 가치로 환산한 가격은 CO₂는 약 500,000 won/ton, SO₂는 약 2,000,000 won/ton, NO₂는 약 5,000,000 won/ton으로 분석된다 (Choi, 2011).

식생의 가치평가 방법으로는 비시장가치 (non-market valuation)로 간접사용가치 (indirect use value)에 의한 대체비용법 (replacement cost technique)을 이용하여 산출하였다. 이에 온실가스는 CO₂ 회수와 저장에 따른 대체비용방법 (Choi, 2011), 대기오염은 NO₂와 SO₂의 처리비용을 이용한 대체비용방법을 적용하였다 (Kim et al., 2012). 물질별 처리비용단가는 CO₂ 55,094 won/ton, NO₂ 7,440,000 won/ton, SO₂ 1,821,000 won/ton을 적용하였다 (Kim et al., 2012; Choi, 2011).

온실가스-대기오염 통합 흡수량에 따른 환경가치분석 산정결과 이산화탄소 흡수량에 따른 환경편익

Table 5. Environmental value for atmospheric purification by GHG-AP integrated sink as CO_{2eq}, NO₂ and SO₂.

Contents	Sink (ton/yr)	Cost (won/ton)	Cost reduction (won/yr)
CO _{2eq}	12,987,173	55,094	715,515,309,262
NO ₂	15,608	7,440,000	116,123,520,000
SO ₂	7,699	1,821,000	14,019,879,000
Sum			845,658,708,262

은 약 7,000억으로 산출되었으며, NO₂와 SO₂은 각각 약 1,000억과 140억으로 산출되었다. 이에 따른 서울시 식생에 의한 총 환경가치는 약 8,000억으로 평가되었으며, 이는 Kim et al. (2012)의 연구에 의한 2008년 기준 국내 산림에 의한 공익기능 (대기정화기능) 평가액인 16조 8,365억원과 비교하면 서울시 식생에 의한 환경가치는 약 5%에 해당하는 것으로 평가되었다.

4. 결 론

2010년 서울시를 대상으로 식생부문별 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출량 인벤토리 구축을 하였으며, 식생원단위분석과 환경가치분석을 통하여 서울시 행정구역별 온실가스-대기오염 통합 흡수/배출 특성을 분석하였다.

2010년 서울시 식생부문 온실가스 흡수량은 12,987,573 tonCO_{2eq}으로 산정되었으며, 순수한 식생에 의한 흡수량은 3,172,866 tonCO_{2eq}이며, 식생토양에 의한 흡수량은 9,814,707 tonCO_{2eq}로 이는 순수 식생에 의한 온실가스 흡수량 대비 약 3배 많은 것으로 나타났다. 대기오염 흡수/배출량은 각각 23,309 tonAP, 2,629,797 tonAP으로 산정되었으며, 행정구역별로는 서초구가 가장 많은 흡수/배출량을 보였으며, 노원구, 은평구, 관악구, 강북구 순으로 나타났다.

행정구역별 식생의 흡수/배출원단위 분석결과, 면적당 온실가스 흡수량은 3,683~44,569 tonCO_{2eq}/km²의 범위로 나타났으며, 대기오염 흡수/배출량은 각각 6~83 tonAP/km², 713~10,814 tonAP/km²의 범위로 조사되었다. 행정구역별 면적당 온실가스 흡수량은 강북구가 가장 많은 흡수량을 보였으며, 은평구, 관악구, 노원구 순으로 높은 흡수량을 보였다. 또한 대기오염

흡수량은 강북구, 도봉구, 은평구, 관악구, 노원구 순으로 높게 나타났으며, 배출량은 관악구가 가장 많은 배출량을 보였으며, 강북구, 은평구, 도봉구, 노원구 순으로 나타났다.

온실가스-대기오염 통합 흡수량에 따른 환경가치 분석결과 총 환경가치는 약 8,000억으로 산출되었으며, 이는 2008년 기준 국내 산림에 의한 공기기능 평가액 대비 약 5%의 비율을 차지하는 것으로 평가되었다.

본 연구의 결과로 서울시 식생의 잠재적 환경가치는 크며, 지속적인 연구를 통하여 온실가스-대기오염 통합 처리비용 등의 객관적이고 정량/정성적인 경제성 평가방법이 필요하다고 사료된다. 또한, 식생 부문의 온실가스-대기오염 통합 흡수 배출량 산정에 관하여 본 연구에서 나타난 기술적인 한계성을 개선해 나갈 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다 (과제번호: 2014-1599).

References

CCIC (Climate Change Information Center) (2013) <http://www.climate.go.kr/>.

Choi, C.-H. (2011) Study on improvement of evaluation method of air pollution removal function of urban forest for accurate estimation of its environmental value, Kyungpook National University, 62.

Deng, S., Y. Shin, Y. Jin, and L. Wang (2011) A GIS-based approach for quantifying and mapping carbon sink and stock values of forest ecosystem, *Energy Procedia*, 5, 1535-1545.

EEA (European Environment Agency) (2013) EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013.

GRI (Gyunggi Research Institute) (2009) Quantification of CO₂ uptake by urban trees and green space management for C sequestration.

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.

KEC (Korea Environment Corporation) (2012) Guidelines for local government greenhouse gas inventories (Ver. 3.0).

Kim, J.-H., R.-H. Kim, H.-J. Youn, S.-W. Lee, H.-T. Choi, J.-J. Kim, C.-R. Park, and K.-D. Kim (2012) Valuation of nonmarket forest resources, *J. Kor. Inst. For. Rec.*, 16(4), 9-18. (in Korean with English abstract)

Kim, Y.-P. and M.-J. Yeo (2013) The trend of the concentration of the criteria pollutants, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(4), 369-377. (in Korean with English abstract)

Lee, D.-K. and P. Chan (2009) The analysis of potential reduction of CO₂ emission in soil and vegetation due to land use change, *J. Korean Env. Res. Tech.*, 12(2), 95-105. (in Korean with English abstract)

Lee, G.-G. (2003) Sustainability indicators of greenspace in apartment sites, Seoul National University Dissertation.

Lee, K.-H., Y.-M. Son, and Y.-S. Kim (2001) Greenhouse gas inventory in land use change and forest in Korea, *J. Kor. For. En.*, 20(1), 53-61. (in Korean with English abstract)

MLTM (Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs) (2009) <http://www.molit.go.kr/>.

NIER (National Institute of Environment Research) (2010) Assessment manual of national air pollutant emission inventory (II).

NIER (National Institute of Environment Research) (2013) Assessment manual of national air pollutant emission inventory (III).

Peltoniemi, M., T. Palosuo, S. Monni, and R. Mäkipää (2006) Factor affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forest soils and vegetation, *Forest Ecology and Management*, 232, 75-85.

Seoul City (2011) Seoul statistical yearbook.

SDI (Seoul Development Institute) (2010) A study on ensuring carbon reservoir and reducing carbon emissions plan.

Song, C.K., S.-K. Lee, and J.-S. Yoon (2011) A review of the integrated strategy for climate change and air pollution management, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27(6), 805-818. (in Korean with English abstract)

WHO (World Health Organization) (2009) <http://www.who.int/>.

Yoo, S.-H., J. Hoe, J.-H. Jung, S.-H. Han, and K.-M. Kim (2011) Estimation of aboveground biomass carbon stock using landsat TM and ratio images-kNN algorithm

and regression model priority, J. KOGSIS, 19(2),
39-48. (in Korean with English abstract)
Zhang, W., B. Huang, and D. Luo (2013) Effect of land use and

transportation on carbon sources and carbon sinks :
a case study in Zhenzhen, China, Landscape and
Urban Planning, 2441.