

지역 온실가스 인벤토리의 주요 배출원 분석 적용 방안 연구: 서울시를 중심으로

강성민* · 차주원** · 유정민*** · 이소진****†

*서울연구원 탄소중립센터 초빙부연구위원, **서울연구원 탄소중립센터 연구원, ***서울연구원 탄소중립센터 연구위원

Application of key category analysis in regional greenhouse gas inventory in Seoul

Kang, Seongmin* · Cha, Juwon** · Yu, Jungmin*** and Lee, Sojin****†

*Visiting Associate Research Fellow, Center for Carbon Neutrality, The Seoul Institute, Seoul, Korea

**Researcher, Center for Carbon Neutrality, The Seoul Institute, Seoul, Korea

***Research Fellow, Center for Carbon Neutrality, The Seoul Institute, Seoul, Korea

ABSTRACT

The Korean government declared a goal of carbon neutrality in 2020, and local governments are also developing carbon neutrality and green growth plans under the Basic Act on Carbon Neutrality. To establish such a policy-based plan, it is important to have a reliable GreenHouse Gas (GHG) inventory. This study examines the application of the Key Category Analysis (KCA) methodology to regional inventories. The KCA is currently applied using the 2006 IPCC Guidance methodology, but the 2019 IPCC Guidance presents an improved methodology for assessing trends, so differences in the applications were examined. In addition, the national-level inventory KCA do not apply the Scope 2 emissions concept, which takes into account electricity and thermal energy, which are considered at the regional level, and are therefore examined together in this study. The difference between applying these methods was also examined in an analysis for Seoul. The existing methodology does not apply absolute values to some factors, resulting in a large variation in the factors to be considered. In addition, an improved methodology to select major emission sources is necessary for reliable management of GHG in the region. To comply with emission standards, the inclusion of Scope 2 emissions in the calculation could improve the management of major GHG sources. Inclusion of data such as emissions by type of GHG gas and by fuel could allow application of this method to other local governments.

Key words: Regional, Greenhouse Gas, Inventory, IPCC G/L, Key Category Analysis

1. 연구배경 및 목적

지난 2015년 모든 UNFCCC 당사국은 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 2℃ 이내, 나아가 1.5℃를 넘지 않도록 합의하는 파리협정을 체결하였다(UNFCCC, 2015). 이후, 유럽연합과 미국 등을 중심으로 세계 120여 개 국가가 탄소중립을 선언하고 적극적인 정책 방안을 수립·실행 중이다(Lee and Lee, 2021; Kim et al., 2023). 우

리나라 역시 지난 2020년 7월 탄소중립을 선언하여 탄소 중립을 위한 국제적인 기후변화 대응에 동참하였다. 2021년 9월, 「기후변화 대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법」(이하 탄소중립기본법)을 제정하여 탄소중립 비전과 이행 체계를 법제화하였으며, 이를 바탕으로 상향된 국가 온실가스 감축목표를 UNFCCC에 제출한 바 있다(2021년 12월).¹⁾ 지난 2023년 3월에는 부문 및 연도별 온실가스 감축목표를 구체적으로 제시한 「제1차 국가 탄소중립·녹

†Corresponding author : slee@si.re.kr (57, Nambusunhwan-ro, 340-gil, Seocho-gu, Seoul, 137-071, Korea. Tel. +82-2-2149-1159)

ORCID 강성민 0000-0001-8628-8241
차주원 0009-0005-3703-6714

유정민 0009-0008-9116-8576
이소진 0000-0002-9054-572X

Received: April 4, 2024 / Revised: May 1, 2024 / Accepted: June 3, 2024

1) 정부는 기존 2030년 26.3% NDC 감축 목표를 40%로 상향함(2018년 기준).

색성장 기본계획」을 발표하였다(2050 CNC, 2023).

국제사회는 파리협정 당사국의 온실가스 감축목표 달성 여부와 국제적인 온실가스 감축목표 이행을 점검하는 과정(Global stocktaking)을 2023년부터 5년 단위로 진행하고 있으며, 관련하여 많은 논의가 이루어지고 있다(Eliza, 2018; UNFCCC, 2023; Yoon and Kim, 2019). 이행점검 과정은 국제 기후 목표와 실적과의 차이를 파악하고 목표 달성을 위해 필요한 실천과 지원을 제안하여 향후 이를 2025년 각국의 NDC 목표에 반영하고자 함이다(UNFCCC, 2024). 이러한 국제사회의 이행점검 요구에 효과적으로 대응하기 위해서는 신뢰성 높은 온실가스 인벤토리 구축이 필수적이다. 현재 우리나라 정부는 IPCC 지침에 따라 매년 온실가스 인벤토리 보고서를 작성하고 있는데, 여기에는 배출원별 배출 현황 및 주요 온실가스 배출원, 온실가스 배출량의 불확도 등을 제시하고 있다(GIR, 2022). 특히, 주요 온실가스 배출 부문의 배출량 산정 정확성을 높이기 위한 방안으로 ‘주요 배출원 분석(Key Category Analysis)’을 수행하고 있는데, 이는 단일 연도의 국가 온실가스 배출에 기여하는 주요 배출원 및 전체 추세에 영향을 미치는 주요 배출원을 선정하는 방법이다. 주요 배출원으로 평가된 배출·흡수원은 국가 온실가스 배출량에 미치는 영향이 크므로 보다 적극적인 산정방식의 고도화와 품질관리가 요구된다. 2006 IPCC GL은 이러한 주요 배출원 분석을 주요 배출원에 대한 온실가스 인벤토리의 불확도를 줄이고 신뢰성을 높이기 위한 절차로 규정하고 있다(Herold et al., 2006).

한편, 최근 정부의 ‘탄소중립·녹색성장 기본계획’(2023년 4월)이 수립되면서 각 광역 및 기초 지자체별로 기본계획 수립을 진행 중이다. 지역의 탄소중립 계획수립을 위해서는 지역의 온실가스 배출 및 흡수 통계가 필수적이다. 이에 앞으로 탄소중립을 추진 중인 많은 지자체에서 자체적인 온실가스 인벤토리 산정에 대한 필요성과 관심이 커지고 있으며, 인벤토리의 신뢰성을 높이기 위해서는 주요 배출원에 대해 파악하고 관리할 필요가 있다.

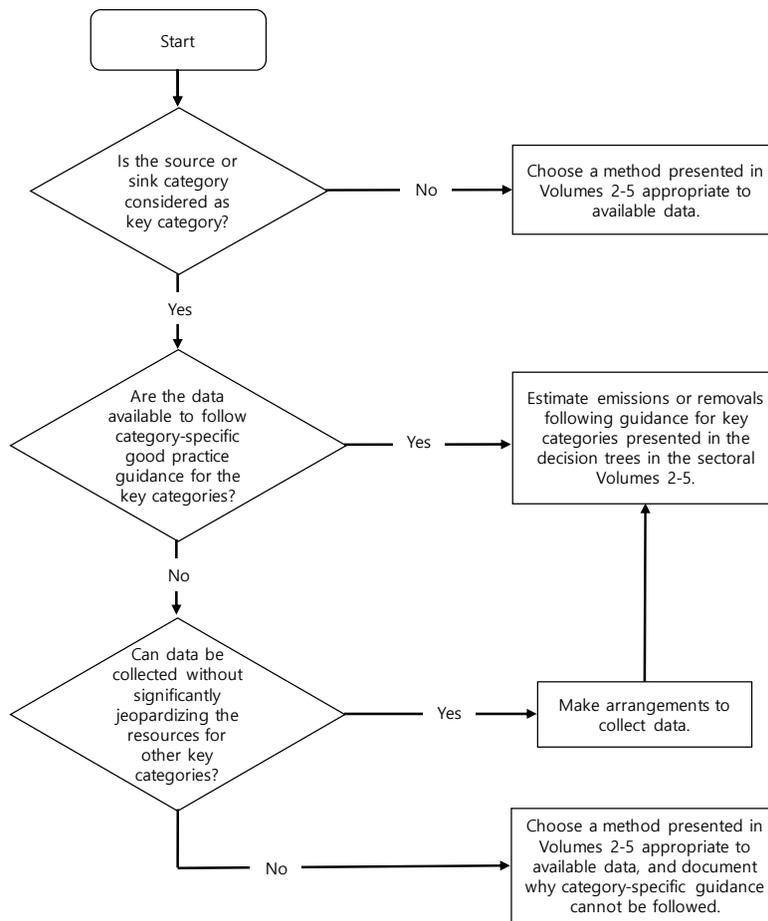
서울시는 지난 2005년부터 매년 자체적인 온실가스 배출량을 산정하여 시의 기후변화 정책 평가와 수립에 활용하고 있다. 서울시 인벤토리는 지역의 활동량 데이터를 기초로 산정되기 때문에 보다 구체적인 배출 현황을 파악할 수 있으며, 최근 2023 서울시 인벤토리 보고서는 배출계수와 GWP 등을 현행화 및 재산정하여 시계열 인벤토리의 정확성을 향상하였다(Seoul, 2023). 또한 기존 건물 부문에 포함되었던 전기차 충전 배출량을 별도로 집계하

여 수송부문에서 관리하도록 인벤토리 구조도 개선하였다. 하지만, 향후 서울시 탄소중립 정책의 모니터링과 정책수립을 위해서는 인벤토리의 부문별·공간적 세부화, 그리고 수송부문 주행거리 기반의 산정 방법(VKT) 도입 등 개선 과제가 남아있다. 또한 앞서 설명한 주요 배출원 분석 및 관리는 미흡한 상황이다.

이에 본 연구에서는 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 선행되고 있는 주요 카테고리 분석을 지역단위 인벤토리에 적용할 수 있는 방안을 검토하였다. 그리고 최근 2006 IPCC 지침의 개선판인 2019 IPCC refinement에서 주요 카테고리 분석 방법의 변경이 있어 방법론 변경에 따른 차이에 대해서도 함께 비교하였다.

2. 주요 배출원 분석 개요

주요 배출원 분석은 일본, 영국, 미국 등 Annex 1 국가들의 국가인벤토리보고서(NIR)에 적용하고 있으며, 우리나라의 국가인벤토리보고서에도 관련 내용이 담겨있다(EPA, 2023; GIR, 2022; NIES, 2023; Ricardo-AEA, 2023). 그 외에 서울시가 온실가스 배출량 산정할 때, 적용하고 있는 한국환경공단의 지자체 온실가스 배출량 산정 지침에도 주요 배출원 분석에 대한 내용을 언급하고 있다(KEC, 2017). 주요 카테고리 분석은 인벤토리의 추세, 불확도 등에 영향을 미칠 수 있는 주요 배출 및 흡수원을 파악하는 방법이다(Herold et al., 2006). 특히, 일부 연구에서는 주요 배출원을 찾고 이를 개선하는 것이 배출량 및 인벤토리의 불확도를 개선하는 데 도움이 된다고 제시하고 있다(Flugsrud et al., 1999; Morgan and Henrion, 1990; Rypdal and Flugsrud, 2001; Rypdal and Winiwarter, 2001). 주요 배출원 분석은 우선적으로 개선되어야 할 인벤토리 방법론과 개발 필요한 배출계수 등을 결정하기 위해 진행된다. 주요 배출원으로 선정된 배출 및 흡수원은 전체 배출량에 미치는 영향이 크기 때문에 산정 방식의 고도화 및 품질을 관리하는데 주의해야 한다. 주요 배출원으로 선정된 배출 및 흡수원은 방법 및 배출계수 등을 최신화하여 관리해야 하며, QA/QC가 제대로 되었는지 확인해야 한다. 주요 배출원을 분석하기 위해서는 인벤토리의 카테고리 and 온실가스 종류 등을 세분화하는 것이 중요하다. 주요 카테고리 분석은 특정 카테고리의 온실가스 배출을 온실가스 종류별로 상세 분류하며, 특히 에너지 연소 부문은 연료의 종류(고체, 액체, 기체)까지 상세 분류하여야 한다. 주요 카테고리 분석 방법은 Approach 1과 Approach 2



Sources: Goodwin et al., 2019

Fig. 1. Decision tree to choose a good practice method for key category

로 나눌 수 있으며, Approach 1은 배출량만을 기준으로 산정하는 것이며, Approach 2는 배출량과 불확도를 함께 고려하여 산정하는 방법이다. 주요 카테고리 분석은 Fig. 1과 같은 의사 결정 트리를 따른다.

3. 연구방법

3.1. 연구 대상 지역 선정 및 주요 배출원 분석 적용 방법

본 연구에서는 지역단위 온실가스 인벤토리의 주요 배출원 분석 방법 적용 방안을 검토하기 위해서, 서울시를 연구 대상 지역으로 선정하였다. 서울시는 온실가스 인벤토리를 2005년 자료부터 연도별로 자체적 인벤토리를 산정 및 관리하고 있으므로 관련 기반 자료들을 분석하기 용이하다는 측면에서 서울시를 대상으로 온실가스 인벤토리를 구축하고 주요 배출원을 분석하였다.

서울시의 온실가스 인벤토리는 2006 IPCC 지침의 온실가스 배출량 산정방법론을 기반으로 만들어진 「지자체 온실가스 배출량 산정 지침 Ver 4.1」을 기준으로 구축하였다(KEC, 2017). 배출량은 지침에서 제시하고 있는 산정식 및 배출계수와 최신화된 국가 온실가스 배출계수를 적용하여 산정하였다. 활동자료는 서울시의 통계자료를 기반으로 사용하였으며, 에너지 부분의 경우에는 국가석유정보시스템, 지역에너지통계연보, 도시가스통계연보 자료를 사용하였다. 또한, 축산은 농림수산식품통계, 산림은 임업통계연보, 농업 부분은 농림통계연보를 사용하였다. 폐기물의 경우, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황 자료와 산업폐수의 발생과 처리 자료를 사용하였다.

주요 배출원 분석 방법 적용 방안은 크게 두 가지 측면으로 접근하였다. 먼저 방법론 변경에 따른 주요 카테고리의 차이 및 고려 사항에 대해 검토하였다. 현재 많은 나

라들의 국가 인벤토리 보고서에서는 주요 배출원을 파악하기 위해 IPCC 2006 지침을 사용하고 있다. 2019년도에 개선된 IPCC 지침에서는 추세 분석 방법론의 수식이 변경되어 본 연구에서는 방법론 변경에 따른 주요 카테고리 변경 여부와 방법론의 차이를 확인하였다. 두 번째로는 지역 온실가스 인벤토리에서는 Scope 2의 개념도 함께 다루기 때문에 Scope 2 온실가스 배출량을 함께 적용하였을 때 주요 배출원의 변경 및 고려 사항을 함께 검토하여 지역 온실가스 인벤토리 구축 시 주요 배출원을 확인하고 관리할 방안을 확인하였다.

3.2. 주요 배출원 분석 방법

주요 배출원 분석은 크게 수준 평가(level analysis)와 추세 평가로 나누어진다. 수준 평가는 2019 refinement IPCC 지침에서 방법론 변경이 없었으나, 추세 평가(trend analysis)는 2019 refinement IPCC 지침에서 좀 더 간단한 수식으로 변경되었다. 본 연구에서는 2006 IPCC G/L과 2019 refinement IPCC 지침의 추세 평가 방법을 모두 적용하여 방법론 차이에 따른 주요 배출원을 비교하였다.

3.2.1. 주요 배출원 수준 평가 방법

수준 평가는 배출 및 흡수원의 배출량이 전체 배출량에 기여하는 정도를 확인하는 것으로, 본 연구에서는 식 (1)을 사용하여 배출 및 흡수원의 수준을 평가하였으며, IPCC 기준에 따라 상위 95%까지의 값을 주요 배출원으로 고려하였다.

$$L_{x,t} = \frac{|E_{x,t}|}{\sum_i |E_{i,t}|} \tag{1}$$

여기서,
 $L_{x,t}$ = 최근 연도(t) 인벤토리의 배출(흡수)원 항목 x 의 수준 평가
 $|E_{x,t}|$ = t 연도 항목 (x)의 배출(흡수)량 절댓값
 $\sum_i |E_{i,t}|$ = t 연도 항목별(i) 배출(흡수)량 절댓값의 총합

3.2.2. 주요 배출원 추세 평가 방법

추세 평가는 기준 연도와 최근 연도 간의 세부 배출원의 증감 추이와 총배출량 추이가 다른 경향을 가지는지 확인하는 방법이다. 서울시는 2005년도를 기준 연도로 인

벤토리를 산정하고 있으므로, 본연구에서도 기준 연도를 2005년도로 하였으며, 최근 연도는 2021년도로 선정하였다. 2006 IPCC 지침에서의 추세 평가는 식 (2)의 방법을 사용한다. 이 방법은 최근 연도와 기준 연도도 특정 카테고리의 증감률에 전체 배출량의 증감률 영향을 제외한 후 기준 연도의 특정 카테고리의 절댓값 비중을 곱하는 방식으로 계산된다. 본 연구에서는 식 (2)를 사용하여 2006 IPCC 지침 기반의 주요 배출원 추세를 평가하였으며, 해당 가이드라인에 따라 상위 95%까지의 값을 주요 배출원으로 고려하였다.

$$T_{x,t} = \frac{|E_{x,t}|}{\sum_i |E_{i,t}|} \times \left[\left| \frac{(E_{x,t} - E_{x,0})}{|E_{x,0}|} \right| - \frac{(\sum_i E_{i,t} - \sum_i E_{i,0})}{|\sum_i E_{i,0}|} \right] \tag{2}$$

여기서,
 $T_{x,t}$ = 기준 연도(0) 대비 최근 연도(t)의 인벤토리 배출(흡수)원 x 의 추세 평가
 $|E_{x,0}|$ = 기준 연도의 항목 x 의 배출(흡수)량 절댓값
 $\sum_i |E_{i,0}|$ = 기준 연도의 항목들 i 의 배출(흡수)량 절댓값의 합산
 $E_{x,0}$ = 기준 연도의 항목 x 의 배출(흡수)량
 $E_{x,t}$ = 최근 연도의 항목 x 의 배출(흡수)량
 $\sum_i E_{i,0}$ = 기준 연도의 배출(흡수)량 총합
 $\sum_i E_{i,t}$ = 최근 연도의 배출(흡수)량 총합

한편 세부 배출원 기준 연도 배출량이 0일 때는 식 (3)의 방법을 사용한다.

$$T_{x,t} = \left| \frac{E_{x,t}}{\sum_i |E_{i,0}|} \right| \tag{3}$$

최근 2019 IPCC refinement에서의 추세 평가는 기존 방식인 식 (2)와 식 (3)과 다른, 식 (4)의 방법을 사용한다. 이 방법은 특정 카테고리의 최근 연도와 기준 연도의 변화량이 전체 배출량 변화량에서 차지하는 비율을 고려하는 방법으로 2006 IPCC 지침의 방식보다 간단하게 변경되었다. 본 연구에서는 식 (4)의 방법도 함께 고려하였으

며, 이 방법에서도 상위 95%까지의 카테고리를 주요 카테고리로서 산정하였다.

$$T_{x,t} = \left| \frac{E_{x,t} - E_{x,0}}{\sum_i E_{i,t} - \sum_i E_{i,0}} \right| \quad (4)$$

여기서,

$T_{x,t}$ = 기준 연도(0)와 대비 최근 연도(t)의 인벤토리 배출(흡수)원 항목 x 의 추세 평가

$E_{x,0}$ = 기준 연도(0)의 항목 x 의 배출(흡수)량

$E_{x,t}$ = 최근 연도의 항목 x 의 배출(흡수)량

$\sum_i E_{i,0}$ = 기준 연도의 배출(흡수)량 총합

$\sum_i E_{i,t}$ = 최근 연도의 배출(흡수)량 총합

4. 연구 결과

4.1. 온실가스 인벤토리 수준 평가에 따른 주요 배출원

서울시의 온실가스 인벤토리에 대한 2021년도의 수준 평가 및 주요 배출원 결과를 Table 1에 나타내었다. 수준 평가 결과, 전체 배출량 중 누적 95%에 해당하는 배출원은 총 9개로 나타났다. 첫 번째 순위의 온실가스 배출원은 수송부문 중 도로이동부문의 CO₂이다. 도로이동부문의

배출량은 2021년에 7,064 천톤CO_{2eq}이며, 이는 전체 직접 온실가스의 전체 배출량 중 28%를 차지하고 있다. 그다음으로는 기타부문 중 가정에서의 기체연료 사용에 따른 CO₂ 배출, 폐기물 매립에 의한 CH₄ 배출 순으로 나타났다. 2021년 수준 평가 기준 주요 배출원은 산업 공정 분야의 HFCs 배출 이외에는 주로 연료 연소에 의한 온실가스 배출, 폐기물 분야에서의 온실가스 배출인 것으로 분석되었다.

4.2. 온실가스 인벤토리 추세 평가에 따른 주요 배출 및 흡수원

4.2.1. 2006 IPCC 지침 기준 온실가스 인벤토리 추세 평가에 따른 주요 배출 및 흡수원

추세 평가를 통해 선정된 서울시의 주요 배출 및 흡수원을 Table 2에 나타내었다. 추세 평가 결과, 총 16개의 배출원으로부터의 배출량 합이 전체 배출량 중 95%에 해당하는 것으로 나타났다.

첫 번째 순위의 온실가스 배출원은 에너지산업 분야의 기체연료 사용에 따른 CO₂ 배출이며, 그다음으로는 폐기물 매립을 통한 CH₄ 배출, 제조업 및 건설 부문의 액체 연료 사용에 따른 CO₂ 배출 순으로 나타났다. 수준 평가 결과에 포함되었던 부문들 이외에도 제조업 및 건설 부문, 기타 부문에서의 고체연료 사용, 산업 공정 분야의 기타제품 생산 및 사용 등이 주요 배출원에 포함되었다.

Table 1. GHG Key category at Seoul through level analysis

Category Codes and Names	GHG	Absolute value of emissions/removals (2021) $ E_{x,t} $ Gg CO _{2eq}	Level assessment $L_{x,t}$	Cumulative sum of level assessment	Rank of Level Assessment
1A3b, Transport - Road transportation	CO ₂	7,064	0.28	0.28	1
1A4b, Other sectors-Residential, Gas	CO ₂	5,613	0.22	0.49	2
4A2, Solid Waste Disposal	CH ₄	4,370	0.17	0.67	3
1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Gas	CO ₂	2,326	0.09	0.76	4
1A1, Energy Industries, Gas	CO ₂	2,053	0.08	0.84	5
2F1, Refrigeration and air conditioning	HFCs	1,327	0.05	0.89	6
4C, Waste incineration	CO ₂	821	0.03	0.92	7
1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Liquid	CO ₂	551	0.02	0.94	8
1A3a, Transport-Civil Aviation	CO ₂	281	0.01	0.95	9

Table 2. GHG Key category at Seoul through trend analysis based 2006 IPCC G/L

Category Codes and Names	GHG	$E_{x,0}$ (2005)	$E_{x,t}$ (2021)	Trend Assessment	Contribution to Trend	Cumulative Total of Column
1A1, Energy Industries, Gas	CO ₂	1,074	2,053	0.03	0.16	0.16
4A2, Solid Waste Disposal	CH ₄	6,547	5,969	0.02	0.11	0.28
1A2, Manufacturing industries and construction, Liquid	CO ₂	1,283	187	0.02	0.11	0.38
1A3b, Transport - Road transportation	CO ₂	10,095	7,064	0.02	0.11	0.49
4C, Waste incineration	CO ₂	151	821	0.02	0.09	0.58
1A4b, Other sectors-Residential, Liquid	CO ₂	907	119	0.02	0.08	0.66
2F1, Refrigeration and air conditioning	HFCs	958	1,327	0.02	0.08	0.73
1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Liquid	CO ₂	1,091	551	0.01	0.04	0.77
1A1, Energy Industries, Liquid	CO ₂	338	0	0.01	0.03	0.81
1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Solid	CO ₂	332	75	0.01	0.02	0.83
1A4b, Other sectors-Residential, Solid	CO ₂	332	75	0.01	0.02	0.86
1A4b, Other sectors-Residential, Gas	CO ₂	7,000	5,613	0.00	0.02	0.88
1A3a, Transport - Civil Aviation	CO ₂	164	281	0.00	0.02	0.90
1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Gas	CO ₂	3,164	2,326	0.00	0.02	0.92
1A2, Manufacturing industries and construction, Gas	CO ₂	205	39	0.00	0.02	0.93
2G, Other Product Manufacture and Use	N ₂ O	172	13	0.00	0.02	0.95

4.2.2. 2019 Refinement IPCC 지침 기준 온실가스 인벤토리 추세 평가에 따른 주요 배출 및 흡수원

2019년에 변경된 추세 평가 방법론을 사용하여 산정된 서울시의 주요 배출 및 흡수원을 Table 3에 나타내었다. 추세 평가 결과, 총 15개의 배출원에 대한 배출량의 합이 전체 배출량의 누적 95%에 해당하는 것으로 나타났다. 첫 번째 순위의 온실가스 배출원은 수송부문 중 도로이동에 의한 CO₂ 배출이며, 그다음으로는 기타 부문의 가정에서 기체연료 사용에 따른 CO₂ 배출, 제조업 및 건설 부문의 액체 연료 사용에 따른 CO₂ 배출 순으로 나타났다.

4.2.3. IPCC 추세 평가 방법론 차이에 따른 주요 배출 및 흡수원 비교

2006 IPCC 지침과 2019 refinement IPCC 지침의 추세 평가를 통해 산정된 서울시의 주요 배출 및 흡수원을 Table 4에 나타내었다. 2006 IPCC 과 2019 refinement IPCC 지침 기준 누적 95%의 주요 배출 및 흡수원은 2006 IPCC 지침은 16개, 2019 refinement IPCC 지침은 15개로

선정되었다. 방법론별 주요 배출 및 흡수원의 개수와 각 항목들의 순위는 변경이 있었다. 변경이 없는 항목은 제조업 및 건설업 부문의 액체 연료 사용에 따른 CO₂ 배출과 기타 부문의 가정에서 액체연료 사용에 따른 CO₂ 배출이다. 가장 큰 변동 폭이 있었던 항목은 기타 부문 중 가정에서 기체연료 사용에 따른 CO₂ 배출로 2006 IPCC 지침 방법 기준으로는 14위였으나, 2019 refinement IPCC 지침 방법 기준으로는 2위로 12단계 상승하였다. 그다음으로는 폐기물 매립에 따른 CH₄ 배출로 기존 방법론(2006 IPCC 지침) 대비 6단계 하락하여 2019 refinement IPCC 지침 방법 기준 8위로 분석되었다. 이러한 차이는, 산정 방식에 따른 차이로 인해 발생한다. 2006 IPCC 지침에 따른 현재 방법은 대상 배출 및 흡수원이 기준 연도에 차지하고 있는 비율과 기준연도 대비 최근 연도 배출원, 전체 배출량에 따른 증감률에 영향을 받지만, 개선된 방법에서는 기준 연도의 대상 배출 및 흡수원 대비 최근 연도의 절대적인 변화량에 영향을 받기 때문에 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

Table 3. GHG Key category at Seoul through trend analysis based on 2019 refinement IPCC G/L

Category Codes and Names	GHG	$E_{x,0}$ (2005)	$E_{x,t}$ (2021)	Trend Assessment	Contribution to Trend	Cumulative Total of Column
1A3b, Transport - Road transportation	CO ₂	10,095	7,064	0.39	0.25	0.25
1A4b, Other sectors-Residential, Gas	CO ₂	7,000	5,613	0.18	0.11	0.36
1A2, Manufacturing industries and construction, Liquid	CO ₂	1,283	187	0.14	0.09	0.46
1A1, Energy Industries, Gas	CO ₂	1,074	2,053	0.13	0.08	0.54
1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Gas	CO ₂	3,164	2,326	0.11	0.07	0.61
1A4b, Other sectors-Residential, Liquid	CO ₂	907	119	0.10	0.07	0.67
4C, Waste incineration	CO ₂	151	821	0.09	0.06	0.73
4A2, Solid Waste Disposal	CH ₄	6,547	5,969	0.08	0.05	0.77
1A4a, Other sectors-Commercial / Institutional, Liquid	CO ₂	1,091	551	0.07	0.04	0.82
2F1, Refrigeration and air conditioning	HFCs	958	1,327	0.05	0.03	0.85
1A1, Energy Industries, Liquid	CO ₂	338	0	0.04	0.03	0.88
1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Solid	CO ₂	332	75	0.03	0.02	0.90
1A4b, Other sectors-Residential, Solid	CO ₂	332	75	0.03	0.02	0.92
1A2, Manufacturing industries and construction, Gas	CO ₂	205	39	0.02	0.01	0.93
2G, Other Product Manufacture and Use	N ₂ O	172	13	0.02	0.01	0.95

Table 4. Comparison of GHG key categories according to methodology

Rank of Level Assessment	Category Codes and Names		
	2006 IPCC G/L (a)	2019 IPCC Refinement (b)	Differ (b-a)
1	1A1, Energy Industries, Gas	1A3b, Transport-Road transportation	↑ 3
2	4A2, Solid Waste Disposal	1A4b, Other sectors-Residential, Gas	↑ 12
3	1A2, Manufacturing industries and construction, Liquid	1A2, Manufacturing industries and construction, Liquid	0
4	1A3b, Transport-Road transportation	1A1, Energy Industries, Gas	↓ 3
5	4C, Waste incineration	1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Gas	↑ 2
6	1A4b, Other sectors-Residential, Liquid	1A4b, Other sectors-Residential, Liquid	0
7	2F1, Refrigeration and air conditioning	4C, Waste incineration	↓ 2
8	1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Liquid	4A2, Solid Waste Disposal	↓ 6
9	1A1, Energy Industries, Liquid	1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Liquid	↓ 1
10	1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Solid	2F1, Refrigeration and air conditioning	↓ 3
11	1A4b, Other sectors-Residential, Solid	1A1, Energy Industries, Liquid	↓ 2
12	1A4b, Other sectors-Residential, Gas	1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Solid	↓ 2
13	1A3a, Transport - Civil Aviation	1A4b, Other sectors-Residential, Solid	↓ 2
14	1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Gas	1A2, Manufacturing industries and construction, Gas	↑ 1
15	1A2, Manufacturing industries and construction, Gas	2G, Other Product Manufacture and Use	↑ 1
16	2G, Other Product Manufacture and Use		

4.3. Scope 2 배출을 고려한 인벤토리 주요 배출원 평가

국가 인벤토리의 주요 배출원 평가는 국가 전체를 대상으로 하기 때문에 일반적으로 Scope 2의 개념은 적용되지 않는다. 하지만, 지역 인벤토리의 경우 열 및 전기 사용에 의한 온실가스 배출도 관리 대상에 포함하여 산정해야 할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 Scope 2 배출을 고려하였을 때의 서울시를 대상으로 한 지역 인벤토리의 주요 배출원 순위를 산정하였다.

4.3.1. Scope 2 배출을 고려한 인벤토리 주요 배출원 수준 평가

서울시를 대상으로 Scope 2 배출을 고려하여 2021년의 주요 온실가스 배출원 수준 평가 결과를 Table 5에 나타내었다. 평가 결과, 총 11개의 배출원에 대한 배출량의 합이 전체 배출량의 95%에 해당하는 것으로 나타났다. 첫 번째 순위의 온실가스 배출원은 기타 부문 중 공공상업 부문에서 전력 사용에 따른 온실가스 배출이며, 그다음으

로는 수송부문에서 도로이동에 따른 CO₂ 배출, 기타부문에서 가정부문에서의 전력 사용에 따른 온실가스 배출 순으로 나타났다.

직접 배출만 고려할 때와 Scope 2 배출을 함께 고려하였을 때 수준 평가 기준 주요 온실가스 배출원 선정 결과를 Table 6에 나타냈다. 비교 결과, Scope 2 배출을 고려하였을 때 4개의 Scope 2 온실가스 배출원이 추가되고, 기존에 포함되었던 2개의 직접 배출원이 누적 95%에서 제외되면서 결과적으로 총 2개의 주요 배출원이 추가되었다. 추가된 Scope 2의 온실가스 배출원은 모두 전기 사용에 의한 것으로 나타났다.

4.3.2. Scope 2 배출량을 적용한 인벤토리 주요 배출원 추세 평가

Scope 2 배출을 고려한 추세 평가 기준에 따른 서울시의 주요 온실가스 배출원 결과를 Table 7에 나타내었다. 평가 결과, 총 18개의 배출원에 의한 배출량의 합이 전체 배출량의 95%에 해당하는 것으로 나타났다. 첫 번째 순위의 온실가스 배출원은 기타부문 중 공공·상업부문에서 전

Table 5. GHG key category including Scope 2 based on level analysis

Category Codes and Names	GHG	Absolute value of emissions/removals (2021) $ E_{x,t} $ Gg CO ₂ eq	Level assessment $L_{x,t}$	Cumulative sum of level assessment	Rank of Level Assessment
S2.1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Electric	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	14,091	0.29	0.29	1
1A3b, Transport-Road transportation	CO ₂	7,064	0.14	0.43	2
S2.1A4b, Other sectors-Residential, Electric	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	7,001	0.14	0.58	3
1A4b, Other sectors-Residential, Gas	CO ₂	5,613	0.11	0.69	4
4A2, Solid Waste Disposal	CH ₄	4,370	0.09	0.78	5
1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Gas	CO ₂	2,326	0.05	0.83	6
1A1, Energy Industries, Gas	CO ₂	2,053	0.04	0.87	7
2F1, Refrigeration and air conditioning	HFCs	1,327	0.03	0.90	8
4C, Waste incineration	CO ₂	821	0.02	0.91	9
S2.1A2, Manufacturing industries and construction, Electric	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	739	0.02	0.93	10
S2.1A3c. Transport-railways, Electric	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	711	0.01	0.94	11

Table 6. Comparison of level analysis base GHG key categories according to emission criteria

Rank of Level Assessment	Category Codes and Names	
	Scope 1	Scope 1(S1), Scope 2(S2)
1	1A3b, Transport-Road transportation	S2.1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Electric
2	1A4b, Other sectors-Residential, Gas	S1.1A3b, Transport-Road Transportation
3	4A2, Solid Waste Disposal	S2.1A4b, Other sectors-Residential, Electric
4	1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Gas	S1.1A4b, Other sectors-Residential, Gas
5	1A1, Energy Industries, Gas	S1.4A2, Solid Waste Disposal
6	2F1, Refrigeration and air conditioning	S1.1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Gas
7	4C, Waste incineration	S1.1A1, Energy Industries, Gas
8	1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Liquid	S1.2F1, Refrigeration and air conditioning
9	1A3a, Transport-Civil Aviation	S1.4C, Waste incineration
10	-	S2.1A2, Manufacturing industries and construction, Electric
11	-	S2.1A3c, Transport-railways, Electric

Table 7. GHG key category including Scope 2 based on trend analysis

Category Names	GHG	$E_{x,0}$ (2005)	$E_{x,t}$ (2021)	Trend Assessment	Contribution to Trend	Cumulative Total of Column
S2.1A4a, Other sectors- Commercial/Institutional, Electric	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	10,778	14,091	0.07	0.23	0.23
S1.1A3b, Transport - Road transportation	CO ₂	10,095	7,064	0.04	0.13	0.36
S2.1A4b, Other sectors- Residential, Electric	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	5,062	7,001	0.04	0.13	0.49
S1.1A1, Energy Industries, Gas	CO ₂	1,074	2,053	0.02	0.06	0.55
S1.1A2, Manufacturing industries and construction, Liquid	CO ₂	1,283	187	0.02	0.06	0.61
S1.1A4b, Other sectors- Residential, Gas	CO ₂	7,000	5,613	0.02	0.05	0.66
S2.1A4b, Other sectors- Residential, Heat	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	1,369	549	0.01	0.04	0.70
S1.1A4b, Other sectors- Residential, Liquid	CO ₂	907	119	0.01	0.04	0.75
S1.4C, Waste incineration	CO ₂	151	821	0.01	0.04	0.78
S1.1A4a, Other sectors- Commercial/Institutional,Gas	CO ₂	3,164	2,326	0.01	0.04	0.82
S1.1A4a, Other sectors- Commercial/Institutional,Liquid	CO ₂	1,091	551	0.01	0.03	0.85
S1.2F1, Refrigeration and air conditioning	HFCs	958	1,327	0.01	0.02	0.87
S1.1A1, Energy Industries, Liquid	CO ₂	338	-	0.01	0.02	0.89
S2.1A2, Manufacturing industries and construction, Electric	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	1,128	739	0.01	0.02	0.91
S1.1A4a, Other sectors- Commercial/Institutional,Soild	CO ₂	332	75	0.004	0.01	0.92
S1.1A4b, Other sectors- Residential, Solid	CO ₂	332	75	0.004	0.01	0.93
S1.1A2, Manufacturing industries and construction, Gas	CO ₂	205	39	0.003	0.01	0.94
S1.2G, Other Product Manufacture and Use	N ₂ O	172	13	0.003	0.01	0.95

력 사용에 따른 온실가스 배출이며, 그다음으로는 수송부문 중 도로이동에 따른 CO₂ 배출, 기타부문 중 가정부문에서의 전력 사용에 따른 온실가스 배출 순으로 상위 3개의 배출원은 수준 평가 결과와 동일하나, 4번째 이하 배출원 순위부터는 일부 차이가 있는 것으로 나타났다.

직접 배출을 기준으로 하였을 때와 Scope 2 배출을 함께 고려하였을 때의 추세 평가 기준 주요 온실가스 배출원 결과를 Table 8에 나타내었다. 비교 결과, Scope 2 배출을 고려하였을 때 4개의 Scope 2 온실가스 배출원이 추가되고, Scope 2를 고려하기 전 포함되었던 2개의 직접 배출원이 간접배출원에 순위가 밀려 누적 95%안에서 밀려났다. 추가된 Scope 2의 온실가스 배출원은 전기 사용에 의한 배출원 3개와 열 사용에 의한 배출원 1개로 나타났다.

기존에 포함되어 있던 직접 배출원의 경우, Scope 2 온실가스 배출이 포함되면서 기존 순위에서 밀려나는 수준 평가와는 다른 순위의 변동이 있었다. 대표적인 예로, 직

접 배출만 고려하였을 때 가장 높은 순위였던 에너지산업 중 기체연료 사용에 따른 CO₂ 배출이 Scope 2 배출을 함께 고려하였을 때 4번째로 밀려나지만, 직접 배출 기준 4위에 해당하는 수송부문 중 도로수송에 따른 CO₂ 배출은 Scope 2 배출을 고려할 때 2위로 상승하였다. 이러한 차이는 2006 IPCC 지침의 추세 평가 방법론 적용 시 배출원 항목의 증감률에서 전체 배출량의 증감률을 제외할 때 절댓값이 고려되지 않기 때문에 순위의 변동이 생기는 것으로 분석되었다. 배출원 항목의 증감률과 전체 배출량의 증감률에 절댓값이 고려되지 않게 되면, 절대량으로 평가가 어려워지며 배출원과 전체 배출량 증감률의 부호에 따른 영향을 받는다. 본 연구의 경우, Scope 2를 적용하여 상대적으로 전체 배출량의 증감률이 낮아지면서 개별 항목 증감률 영향이 더 커지기 때문에 전체 순위 변동이 발생한 것으로 판단하였다.

Table 8. Comparison of trend analysis base GHG key categories according to emission criteria

Rank of Level Assessment	Category Codes and Names	
	Scope 1	Scope 1, Scope 2
1	1A1, Energy Industries, Gas	S2.1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Electric
2	4A2, Solid Waste Disposal	S1.1A3b, Transport - Road transportation
3	1A2, Manufacturing industries and construction, Liquid	S2.1A4b, Other sectors-Residential, Electric
4	1A3b, Transport-Road transportation	S1.1A1, Energy Industries, Gas
5	4C, Waste incineration	S1.1A2, Manufacturing industries and construction, Liquid
6	1A4b, Other sectors-Residential, Liquid	S1.1A4b, Other sectors-Residential, Gas
7	2F1, Refrigeration and air conditioning	S2.1A4b, Other sectors-Residential, Heat
8	1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Liquid	S1.1A4b, Other sectors-Residential, Liquid
9	1A1, Energy Industries, Liquid	S1.4C, Waste incineration
10	1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Solid	S1.1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Gas
11	1A4b, Other sectors-Residential, Solid	S1.1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Liquid
12	1A4b, Other sectors-Residential, Gas	S1.2F1, Refrigeration and air conditioning
13	1A3a, Transport - Civil Aviation	S1.1A1, Energy Industries, Liquid
14	1A4a, Other sectors-Commercial /Institutional, Gas	S2.1A2, Manufacturing industries and construction, Electric
15	1A2, Manufacturing industries and construction, Gas	S1.1A4a, Other sectors-Commercial/ Institutional, Solid
16	2G, Other Product Manufacture and Use	S1.1A4b, Other sectors-Residential, Solid
17		S1.1A2, Manufacturing industries and construction, Gas
18		S1.2G, Other Product Manufacture and Use

5. 고찰

본 연구는 서울시를 대상으로 인벤토리를 구축하고 지역 단위 인벤토리에 주요 배출원을 선정하는 주 카테고리 분석을 하고 방법론 변경 및 Scope 2 배출량 적용시 고려할 사항을 검토하였다. 주 카테고리 분석은 최근 연도를 기준으로 하는 수준 분석과 기준 연도와 최근 연도의 추세를 고려하여 영향을 미치는 배출원을 선정하는 추세 분석으로 나눌 수 있다. 수준 분석의 경우에는 최근 개선된 2019 refinement IPCC 지침의 방법론에서는 변경사항이 없으나, 추세 분석에서 수식이 변경된다. 추세 분석의 경우 현재 사용되고 있는 2006 IPCC 지침의 방법론은 기준 연도에 분석 대상 배출원이 차지하고 있는 비율에 총 배출량의 증감률 추세를 제외한 배출원의 증감률을 고려하여 주요 배출원을 선정한다. 하지만, 이 방법의 경우에는 기준 연도의 분석 대상 배출원의 비율, 배출원의 증감률, 총 배출량의 증감률과 같은 3가지 요인을 고려해야 한다. 그리고 분석 대상 배출원의 증감률에서 총 배출량의 증감률을 제외하는 수식에서 각각의 값에 절댓값이 고려되지 않아 증감률의 부호와 증감률의 크기에 따라 다양한 영향을 받을 수 있다. 그 외에도 기준 연도의 대상 배출원의 값이 0인 경우에는 기존의 수식이 아닌 기준 연도의 총 배출량 대비 최근 연도 대상 배출원의 배출량으로 산정하여 방법론을 일괄적으로 적용할 수 없다.

최근 개선된 2019 refinement IPCC 지침에서는 증감률이 아닌 전체 기준 연도 대비 변화량에서 대상 배출원의 기준 연도 대비 변화량을 대상으로 분석하기 때문에 절대량 측면에서의 추세를 고려할 수 있으며, 이 방법론은 기준 연도의 대상 배출원의 배출량이 0일 경우에도 일관성을 갖고 분석을 할 수 있다. 따라서, 개선된 방법론이 기존 방법론보다 고려해야 할 요인이 적어 대상 값의 영향을 상대적으로 적게 받을 수 있으며, 일관성을 가지고 주요 배출원을 선정할 수 있으므로, 개선된 방법론으로 변경하는 것이 추세의 영향을 분석하는데 적절할 것으로 판단된다.

Scope 2의 배출량을 적용하는 방안을 검토한 결과, 배출원 관리의 측면에서 주요 배출원 분석에 포함하여 관리하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 주요 배출원분석은 국가단위에서 사용하는 방법론이므로 직접 배출원을 대상으로 분석되지만, 기본 목적이 주요 배출원을 선정하여 방법론 개선 및 계수 개발의 우선순위 결정, 전체 배출량에 미치는 영향력을 확인하고 관리하는 것이다. 따라서,

영향력이 큰 배출원을 우선적으로 확인하고 고도화 하여 개선해 나간다는 측면에서 Scope 2 배출을 함께 고려하여 지역단위에서 주요 배출원으로 관리하여 개선하는 것은 필요하다고 판단된다.

2024년 기준, 지역 온실가스 인벤토리는 국가에서 일괄적으로 산정하여 배포하고 있다. 현재 배포자료의 수준은 부문별 상세 분류상의 온실가스 배출량을 CO₂eq 단위로 제시하고 있으며, 사용 연료 종류 구분과 같은 상세자료가 누락되어 있다. 현 수준의 정보로는 주요 배출원 분석을 하기에는 한계가 있다. 향후 다른 지자체에서 주요 배출원을 분석하기 위해서는 부문에 따른 온실가스 종류별 배출량과 에너지 부문 중 연료 종류에 따른 온실가스 배출량 자료 등을 확보할 필요가 있다. 최근 정부에서도 지자체 온실가스 배출량 산정과 관련된 지침 및 Tool을 배포하였다. 이러한 자료를 기반으로 자체 인벤토리를 구축하거나 온실가스 배출량 관리를 위해 관련 상세 정보를 적용 요청한다면, 주요 배출원의 파악 및 관리가 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 지역 단위의 인벤토리에 국가 수준에서 적용하고 있는 주요 배출원 분석 방법을 적용하여 주요 배출원을 선정하는 방안에 대해 검토하였다. 추가로 2019년에 개선된 IPCC 지침에서 제시되고 있는 방법에 따른 차이와 Scope 2의 개념을 적용하였을 때의 차이를 함께 검토하였다. 현재 온실가스 종합정보센터에서 제시하고 있는 지역 인벤토리는 온실가스 종류별 배출량 및 연료에 따른 부분이 제시되어 있지 않아서 본 연구에서는 서울시를 대상으로 온실가스 인벤토리를 구축하고 주요 배출원을 분석하였다.

서울시의 수준 평가 결과, 주요 배출원은 직접 배출만 고려할 경우 9개, Scope 2 배출을 함께 고려할 경우 11개로 선정되었다. 추세 평가 기준 주요 배출원 평가는 방법론의 변경에 따른 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다. 추세 평가 결과, 주요 배출원은 기존 방법론의 경우 16개의 배출원이, 개선된 방법론의 경우 15개 배출원이 선정되었다. 기존 방법을 적용한 Scope 2 고려에 따른 추세평가 배출원은 18개로 선정되었다.

서울시의 직접 배출 기준 수준 평가 주요 배출원은 주로 에너지 분야 중 기체 연료 사용과 관련된 부분, 수송부문, 폐기물 분야 중 매립과 소각, 그리고 산업 공정 부문

에서의 HFCs 배출로 선정되었다. 간접 배출을 포함한 수준 평가 주요 배출원은 공공상업과 가정, 철도에서의 전기 사용이 기존 주요 배출원에 추가되었다. 추세 평가 주요 배출원은 수준 평가에서 포함된 배출원과 에너지 부문에서는 액체 연료 사용과 열 사용, 산업 공정 분야에서는 N₂O 사용에 따른 배출이 추가되었다.

지역에 주요 배출원 분석 방법을 적용하기 위한 방법론들을 검토한 결과, 기존 방법론은 일부 요인들에 절댓값이 적용되지 않아 고려해야 할 요인에 따른 변화가 크기 때문에, 앞으로는 일관성을 가지고 주요 배출원을 선정할 수 있는 개선된 방법론을 적용하는 것이 지역의 온실가스 배출원을 신뢰성 있게 관리할 때 필요할 것으로 판단된다. 다음으로 배출 기준의 경우, Scope 2 배출량을 함께 고려하여 관리한다면, 서울시의 주요 배출원 관리에 도움이 될 수 있을 것이다.

주요 배출원 분석은 한국환경공단에서 배포한 지자체 온실가스 배출량 산정법에도 제시하고 있으며, 온실가스 종류에 따른 배출량과 연료의 종류별 사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하거나 이에 준하는 자료를 확보할 수 있다면, 방법론 적용이 가능하다. 특히, 최근에 정부에서도 배출량 산정과 관련하여 지침과 배출량 산정을 도울 수 있는 시트를 배포하는 등 큰 노력을 하고 있다. 향후 이러한 자료를 기반으로 자체 인벤토리를 구축하거나 구축이 어려울 시에는 온실가스 배출량 관리를 위해 관련 상세 정보들을 요청하여 받는다면 주요 배출원을 파악하고 관리할 수 있으며, 지자체 온실가스 인벤토리의 신뢰성을 향상할 수 있을 것이다.

사사

이 논문은 서울연구원 “서울시 온실가스 인벤토리 고도화(2024-AR-02)” 과제의 지원을 받아 수행되었음.

References

- 2050CNC (Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth). 2023. First national carbon neutrality and green growth basic plan (Government draft). [accessed 2023 Apr 19]. <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=3&boardNo=1397&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=17>
- Eliza NR, Yamide DN, Niklas HH, Joe TT, Kathleen MG. 2018. The ambition of Paris: Designing the Global Stocktake. Washington, D.C., US: World Resources Institute. Working Paper.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2023. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks. Washington, D.C., US: EPA. National Report.
- Flugsrud K, Irving W, Rypdal K. 1999. Methodological choice in inventory preparation. Suggestion for good practice guidance. Oslo, Norway: Statistics Norway. Documents 1999/19.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2022. 2022 national greenhouse gas inventory report of Korea. Sejong, Korea: GIR. National Report.
- Goodwin J, Paciornik N, Gillenwater M. 2019. Chapter 4: Methodological choice and identification of key categories. In: IPCC (ed.). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Vol 1. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 4.1-4.32.
- Herold A, Monni S, Lin E, Meyer CPM. 2006. Chapter 4: Methodological choice and identification of key categories. In: IPCC (ed.). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Vol. 1. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 4.1-4.30.
- KEC (Korea Environment Corporation). 2017. Guidelines for local government greenhouse gas inventories. Incheon, Korea: KEC. Guideline.
- Kim GP, Kang GS, Choi WS, Oh TH, Lee HJ, Oh JH, Lee JE. 2023. Carbon neutrality and green growth strategies EU, U.S, China, and Japan. Sejong, Korea: Korea Institute for International Economic Policy. KIEP Policy Research Briefing 23-15.
- Lee KY, Lee MA. 2021. Trends in carbon-neutral technology policies in major countries: Analysis of G7 countries' carbon neutral technology policy trends and recommendations for domestic policy direction. Seoul, Korea: Green Technology Center. GTC FOCUS No.

- 2-1.
- Morgan MG, Henrion M. 1990. Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. New York: Cambridge University Press.
- NIES (National Institute for Environmental Studies). 2023. National inventory reports of Japan. Ibaraki, Japan: NIES. National Report.
- Ricardo-AEA. 2023. UK Greenhouse Gas Inventory. Oxfordshire, UK: Ricardo-AEA. National Report.
- Rypdal K, Flugsrud K. 2001. Sensitivity analysis as a tool for systematic reductions in greenhouse gas inventory uncertainties. *Environ Sci Policy* 4(2-3): 117-135.
- Rypdal K, Winiwarter W. 2001. Uncertainties in greenhouse gas emission inventories - Evaluation, comparability and implications. *Environ Sci Policy* 4(2-3): 107-116.
- Seoul. 2023. GHG inventory report of Seoul. Seoul: Seoul. City Report.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2015. Paris Agreement. [accessed 2023 Apr 16]. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2023. Technical dialogue of the first Global Stocktake. Synthesis report by the co-facilitators on the technical dialogue. Bonn, Germany: UNFCCC. FCCC/SB/2023/9.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2024. Why the Global Stocktake is important for climate action this decade. https://unfccc.int/topics/global-stocktake/about-the-global-stocktake/why-the-global-stocktake-is-important-for-climate-action-this-decade#tab_home
- Yoon I, Kim M. 2019. A study of international climate change regime based on the analysis of Paris Agreement rulebook (in Korean with English abstract). Sejong, Korea: Korea Legislation Research Institute. Climate Change Legislation Research 19-16-1-01.