

총 설

# 탄소중립을 위한 하향식 온실가스 배출 분석기법 개발 및 활용 방안

## Consideration of Top-down Greenhouse Gas Estimation Approaches to Prepare Carbon Neutral Policy

주상원\*, 이해영, 홍진규<sup>1)</sup>, 권도윤<sup>1)</sup>, 심창섭<sup>2)</sup>, 오영석, 이선란,  
Samuel Takele Kenea, 이수정, 김정은, 부경은  
국립기상과학원 기후연구부, <sup>1)</sup>연세대학교 대기과학과, <sup>2)</sup>한국환경연구원

Sangwon Joo\*, Haeyoung Lee, Jinkyu Hong<sup>1)</sup>, Doyoon Kwon<sup>1)</sup>,  
Changsub Shim<sup>2)</sup>, YoungSuk Oh, Shanlan Li, Samuel Takele Kenea,  
Soojeong Lee, Jeong Eun Kim, Kyung-On Boo

Climate Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo,  
Republic of Korea

<sup>1)</sup>Atmospheric Science Department, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

접수일 2022년 9월 29일  
수정일 2022년 11월 6일  
채택일 2022년 11월 8일

Received 29 September 2022  
Revised 6 November 2022  
Accepted 8 November 2022

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)64-780-6621  
E-mail : swjoo@korea.kr

**Abstract** It is crucial to estimate the greenhouse gas emissions accurately to manage the global climate crisis. In this regard the World Meteorological Organization (WMO) recommended its member countries to develop the Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG<sup>3</sup>IS) as a new approach to estimate greenhouse gas emissions based on atmospheric measurements and numerical weather prediction model. Furthermore, 2019 refinement to the 2006 IPCC guideline for national greenhouse gas inventories includes the IG<sup>3</sup>IS as an independent process of quality assurance, quality control and verification of greenhouse gas emissions to supplement traditional bottom-up method. In these circumstances, Korea Meteorological Administration launched WMO endorsed IG<sup>3</sup>IS project to produce top-down greenhouse gas emissions operationally and we propose to encourage corporation with relevant research groups as follows: (1) Understanding the variations in natural net greenhouse gas emissions stems from climate changes. (2) Refining the uncertainty of the emission of non-CO<sub>2</sub> gases such as CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and F-gases. (3) Identifying the missing or sporadic emission sources with the help of integrating characteristics of the top-down method. (4) Resolving the discrepancy between the national total emission and the integrated emission from the local governments. (5) Prioritizing research areas of reducing emission uncertainty based on the differences between the top-down and bottom-up emissions. (6) Evaluating the impact of greenhouse gas reduction policies.

**Key words:** IG<sup>3</sup>IS, Greenhouse gas, Carbon neutral, Top-down emission, Inverse modelling

## 1. 서 론

전 지구적 협력을 통한 기후위기 대응을 위해 국제 사회는 2015년 파리협정에 합의하고, 신기후 체제를 출범하였다. 2023년부터 5년마다 전 지구적 감축점검 (Global Stock Take; GST)을 수행하고, GST 발표 2년 후에 각 국가는 국가감축기여 (Nationally Determined

Contribution; NDC)를 갱신한다. 즉 5년마다 전 지구적인 온실가스 감축의 실행 성과를 점검하고 이를 바탕으로 국가별 감축안을 조정함으로써 기후위기에 대응하는 체계이다. 또한 각 국가는 2년마다 국가인벤토리보고서 (National Inventory Report; NIR)가 포함된 격년투명성보고서 (Biennial Transparency Report; BTR)를 제출하게 된다. 우리나라를 포함한 파리협약

의 모든 가입 국가는 동일한 지침에 따라 NIR을 작성하고, 불확도를 포함하여 그 산정 과정을 투명하게 제시해야 한다. NIR은 GST를 위한 기본 정보로서, 신뢰성이 중요하고 우리나라도 2024년 말까지 제출해야 하는 의무를 갖는다.

전 지구적 기후위기를 관리하기 위한 신기후 체제의 성공적인 정착은 정확도 높은 온실가스 배출량이 중요하다. 그동안의 노력으로 인위적 이산화탄소 배출량의 불확도는 대부분 10% 이내로 그 신뢰도가 높다(Minx *et al.*, 2021). 그러나 중국 등 동아시아의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출 정보는 다소 불확실한 편이며(Liu *et al.*, 2015) 전 지구 평균기온 상승에 따라 자연적 배출/흡수량의 변화가 커지면 CO<sub>2</sub> 배출량의 신뢰도는 큰 영향을 받게 된다. 메탄(CH<sub>4</sub>)의 예와 같이 2007년 이후 급격한 농도 증가는 인위적 배출량의 변화와 더불어 자연적 배출량의 변화에 기인하는 것으로 밝혀지고 있다(Feng *et al.*, 2022; Lan *et al.*, 2021; WMO, 2019). 또한 이산화탄소 이외의 온실가스의 배출량은 상대적으로 신뢰도가 낮다. 예를 들어 CH<sub>4</sub>나 아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 전체 온실가스 불확도의 98% 수준을 차지하고 있는 것으로 알려졌다(Henne *et al.*, 2018). 따라서 이러한 불확실성을 고려한 총 온실가스 배출량의 지속적인 신뢰도 개선이 요구된다.

정확한 온실가스 배출량을 산출하고 정책적으로 활용하기 위해서는 정보 산출 기간을 단축하는 것이 중요하다. 현재의 상향식 온실가스 배출량 산출 방법은 통계 정보를 기반으로 하고 있다. 통계 정보 산출에 장기간이 소요되어, 통상적으로 국가 배출량을 산출하는 데 2년 정도의 시간지연이 있다. 그러나 가속화되는 기후위기 대응을 위해서는 온실가스 정보의 산출 기간을 크게 단축할 필요가 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)의 1.5°C 특별보고서는 전 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 1.5°C 이내로 제한하기 위한 최선의 시나리오를 제시하였다(IPCC, 2019). 2030년까지 순배출량을 2010년 대비 45% 감축하고, 2050년까지 탄소중립을 달성하고 유지하는 것이다.

즉 향후 20년 정도의 짧은 기간 내에 평균 약 4.17%/년 감축률이라는 도전적인 온실가스 감축목표를 달성해야 한다. 급격한 배출량 감축은 산업과 경제 전반에 큰 타격이 예상되므로, 온실가스 감축 정책의 시행착오를 최소화해야 한다. 특히 현재와 같이 2년 전의 온실가스 배출량 정보를 기반으로 정책을 수립하는 것은 급격하게 변화하는 기후위기 상황에서 온실가스 감축 방향 설정에 문제가 발생할 수 있고, 남은 시간이 많지 않은 상황에서 정책 방향이 잘못되면 그 피해는 더 심각해질 수 있다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 실시간으로 온실가스 변화 정보를 감시하고 온실가스 감축 정책에 반영할 수 있는 체계를 구축하는 것이 필요하다.

기존의 배출량 산정 방안의 한계를 보완하기 위하여 새로운 접근법이 요구되고 있는 상황에서, 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)는 기상모델과 온실가스 측정 역량의 획기적인 발전을 기반으로 하향식 온실가스 정보 산출 기법인 통합 전 지구온실가스정보체계(Integrated Global Greenhouse Gas Information System; IG<sup>3</sup>IS) 개발을 결의하고, 회원국의 개발을 독려하게 되었다(WMO, 2018). WMO IG<sup>3</sup>IS는 기상모델을 이용하여 대기 중에서 관측된 온실가스 농도로부터 배출량을 역으로 추적하는 하향식 배출량 산정 방법이다. 대기의 흐름은 포괄적이므로 경로상의 모든 배출원과 흡수원을 포함하게 되고, 아무리 작은 배출원이라도 누락되지 않는다는 장점이 있다. 또한 실시간으로 측정되는 관측자료를 이용하므로, 관측이 이루어지는 시점마다 배출량 산정이 가능하다. 따라서 실시간으로 배출량을 업데이트할 수 있다는 장점이 있다. WMO/GAW(Global Atmosphere Watch) 관측소의 경우 온실가스 관측자료의 지속적인 품질검사과정 개선을 통해 그 호환성이 CO<sub>2</sub>는 0.1 ppm, CH<sub>4</sub>는 2 ppb 이하로 높은 신뢰도를 유지하고 있다(WMO, 2017). 대기수송모델로 사용되는 기상예보모델도 지속적인 기상관측자료의 증대와 자료동화 기법의 개선을 통해 신뢰도 높은 대기의 흐름을 구현할 수 있게 되었고, 매 10년마다 기상

예측정확도가 1일씩 단축되어, 1980년대의 3일 예측된 수치모델 정확도가 2020년대에는 7일 예측된 수치모델 정확도와 유사하다(Bauer *et al.*, 2015). 이와 같이 개선된 온실가스 관측과 기상예보모델을 기반으로 IG<sup>3</sup>IS를 이용하면 기존의 상향식 배출량 정보를 보완하고 배출량의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것이다. 더욱이 국가 인벤토리작성의 지침이 되는 「2006 IPCC 가이드라인의 2019년 개정판」에 배출량의 품질보증/품질검사 및 검증 방안으로 IG<sup>3</sup>IS가 새롭게 추가되면서 국가 배출량의 불확도 개선을 위한 방안으로 제시되었다(IPCC, 2019).

이러한 흐름에 따라 영국, 스위스, 호주, 뉴질랜드, 독일 등은 이미 2022년 NIR에 IG<sup>3</sup>IS 결과를 배출량의 신뢰도 확보를 위한 검증자료로 활용하고 있다. 우리나라 기상청도 세계기상기구의 공인 사업으로 승인 받은(WMO reference: 11321/2021-SI/AER) INVERSE-KOREA (INverse modelling for Validating and Evaluating Reduction of the Sectoral greenhouse gas Emissions in KOREA) 사업을 통해 하향식 온실가스 기원추적 기법을 개발하고 있다. 2023년까지 개발을 완료하고, 향후 국가 배출량 검증을 위한 과학적 정보로서 활용할 예정이다.

이 논문에서는 하향식 온실가스 분석기법의 특징을 소개하고, 주요 국가의 활용 성과를 기반으로 하여 현재 기상청에서 개발하고 있는 하향식 온실가스 기원 산정 방법의 활용 방안을 제안하고자 한다.

## 2. IG<sup>3</sup>IS의 하향식 온실가스 분석 특성

IG<sup>3</sup>IS의 하향식 온실가스 기원 분석은 대기수송모델을 이용하여 대기농도 변화에 영향을 주는 지면의 온실가스 플럭스를 분석하는 방법이다. 베이시안(Baysian) 이론을 기반으로 가우시안 분포를 가정하고 최적의 배출량을 분석하게 된다.

$$x = x_a + [(PH^T)(HPH^T + R)^{-1}](y_o - H(x_a)) \quad (1)$$

여기에서,  $x$ 는 분석 배출량,  $x_a$ 는 초기 배출량,  $y_o$ 는 관측값(관측소에서 관측된 온실가스 농도),  $H$ 는 전방모델(배출량을 대기 중 온실가스 농도로 변환하는 기상예측모델에 해당),  $P$ 는 선형 오차공분산(선형 배출량의 오차공분산),  $R$ 은 관측오차공분산(관측과 전방모델의 오차 공분산),  $H^T$ 는 선형화된 전방모델의 치환행렬이다.

식 (1)에서 보인 하향식 배출량 산정 방법은 관측이 이루어지는 시점마다 배출량 분석값을 생산할 수 있다. WMO/GAW에 등록된 지구대기감시소는 초단위로 대기 중 온실가스 측정이 이루어지며, 품질검사를 거쳐 매시간 평균된 온실가스 농도값을 생산한다(WMO, 2017). 따라서 짧게는 1시간 간격으로 배출량 분석이 가능하다. 다만 적은 수의 관측소에서 모든 영향 지역의 배출량을 산정하기 위해서는 분석값을 일정 기간 동안 누적할 필요가 있다. 또한 대기모델의 행성계층 모의 능력이 저하되는 야간과 관측소의 국지적인 영향이 지배적인 약한 풍속의 경우는 품질검사를 통해 관측자료를 제거한다. 따라서 분석에 활용 가능한 관측자료를 충분히 확보하기 위해서 장기간의 누적된 자료가 필요하고, 국가 규모의 하향식 배출량은 보통 월별 분석값을 산출하고(United Kingdom, 2022; Henne *et al.*, 2016), 도시 규모에서는 좀 더 조밀한 관측망 확보를 통해 6시간에서 1일 평균 배출량을 분석한다(Lauvaux *et al.*, 2016; Bréon *et al.*, 2015).

하향식 온실가스 분석은 격자단위로 온실가스 배출/흡수에 대한 지면 플럭스를 구할 수 있다는 장점이 있다. 그러므로 작은 규모의 대기 이동을 모의하는 대기수송모델이 있다면 상세한 격자단위로 배출과 흡수 플럭스를 기술적으로 산출할 수 있다. 현재 기상청에서 현업 날씨예보에 이용되는 한반도 규모의 수치모델은 수평분해능이 1.5 km이고, 전 지구 규모의 모델은 10 km이다(KMA, 2020). 따라서 기상청은 수 km의 수평 규모로 온실가스 기원을 산정할 수 있는 기술적 역량을 보유하고 있다. 다만 이러한 고분해능의 정보 산출을 위해서는 선형값으로 입력되는 격자단위의 배출량 정보가 중요하다. 특히 관측이 부족한 경우에

는 분석된 배출량을 추정하는 데 선형값의 중요도가 커지고, 고분해능의 하향식 온실가스 기원 산정의 정확도 개선을 위해서는 상향식으로 산출된 배출량을 상세 격자단위로 전환하는 과정이 필요하다.

식 (1)로부터 분석된 배출량을 대기수송모델에 초기자료로 입력하고 대기의 흐름에 따라 이동시키면 상세한 격자의 3차원 대기 온실가스 농도를 구할 수 있다. 이는 하향식 산출 방법의 장점으로 적은 수의 온실가스 관측망을 이용하여 넓은 지역에 대한 3차원적인 농도분포를 분석할 수 있다. 이미 유럽중기예측센터와 미국해양대기청에서도 현업 운영 중인 수치모델을 이용하여 실시간의 3차원 온실가스의 분포를 모니터링하는 체계를 구축하고 있다(Agusti-Panareda *et al.*, 2019).

하향식 온실가스 분석은 전방모델에 대기수송이 포함되므로 기류의 이동 경로상에 있는 모든 플렉스를 포함하여, 흡수원과 배출원의 누락이 없다는 장점이 있으나, 행정구역별로 배출량을 구분하기 어렵다는 점과 배출원을 부문별로 구별하기 어렵다는 단점이 있다. 부문별 배출량 관련해서는 지역별 주요 배출원을 파악함으로써 정성적으로 분석이 가능하지만 정량적으로 부문별 배출원을 구분하기는 쉽지 않다. 또한 국가별 혹은 행정구역별로 배출량을 구분하기 위해서는 격자별로 행정구역을 구별하고 겹치는 지역에 대해서는 인구통계 등을 이용하여 구분하는 방안이 주로 적용되고 있으나(Janssens-Maenhout *et al.*, 2013), 정확한 구분에 어려움이 있다.

### 3. 국제 동향 및 활용 사례

#### 3.1 WMO와 IPCC의 IG<sup>3</sup>IS 활용 제안

WMO는 제17차 총회에서 2010년 이래 WMO 회원국의 수치 모델링과 대기 관측 분야 진보와 성공을 기반으로 IG<sup>3</sup>IS 개발을 시작하는 결의안을 채택하였다. 이후 IG<sup>3</sup>IS 실행계획을 수립하여 기술적 개발 사항 및 활용 목적을 구체화하였다. 단기적으로는 IG<sup>3</sup>IS를 통

해 온실가스 배출에 대한 추가적인 정보를 전달하고, 전 지구적 이행점검(Global Stocktake) 과정에 활용 가능한 정보 중 하나로서 활용을 기대하고 있다. 장기적으로는 발전된 수치날씨예측과 유사하게 종합적인 통합시스템을 구축하고, 기후위기와 관련한 이해관계자의 복잡하고 어려운 요구에 대응하는 것을 목적으로 한다(WMO, 2018). 즉 IG<sup>3</sup>IS는 수치모델링과 대기 온실가스 관측을 기반으로 하향식 배출량을 산정하는 방법은 물론 하향식 배출량을 활용하여 온실가스 감축에 실질적으로 기여하는 서비스 체계까지를 포함하는 포괄적인 개념이다.

WMO는 2022년 온실가스모니터링 워크숍을 개최하고, IG<sup>3</sup>IS의 장기비전 달성을 위해 모든 고품질 관측자료의 확보 및 통합, 국가 간 자료공유 체계 구축, 수치예측과 같은 실시간 운영체제로의 확장, 온실가스의 측정·보고·검증(Measurement Reporting and Verification)을 통해 실제 배출량 감축에 기여할 수 있는 서비스체계 구축을 강조하면서, 구체적인 실행체제로 WMO 산하에 온실가스감시(Greenhouse Gas Watch; GGW) 신설을 추진하고 있다. 이러한 GGW 상세 계획을 COP27에 발표하고, 제19차 WMO 총회(2023년 6월 예정)에서 GGW의 공식 역할을 결의할 예정이다.

파리협정에 따라 우리나라를 포함한 유엔기후변화 협약에 가입한 모든 국가는 신기후 체제에 따른 의무를 부과받는다. 특히 NIR은 「2006 IPCC 가이드라인」을 준용하도록 되어 있어 우리나라도 2024년 NIR 작성 시 이 가이드라인에 따라서 배출량을 산정해야 한다. 신기후 체제에 따른 국제적 과정과 국내의 대응 과정을 간략하게 소개하였다(그림 1). 국가 온실가스 인벤토리에 대한 IPCC 태스크포스는 「2006 국가 온실가스 IPCC 가이드라인의 2019년 개정판」을 작성하였고, 이 개정판은 2019년 5월 제 49차 IPCC 회의에서 채택/승인되었다. 2019년 개정판의 목적은 국가 온실가스 인벤토리의 준비와 지속적인 개선을 지원할 수 있는 명확한 과학적 기반을 제공하는 것이다. 특히 IG<sup>3</sup>IS를 이용하여 국가 인벤토리를 개선하는 방법과

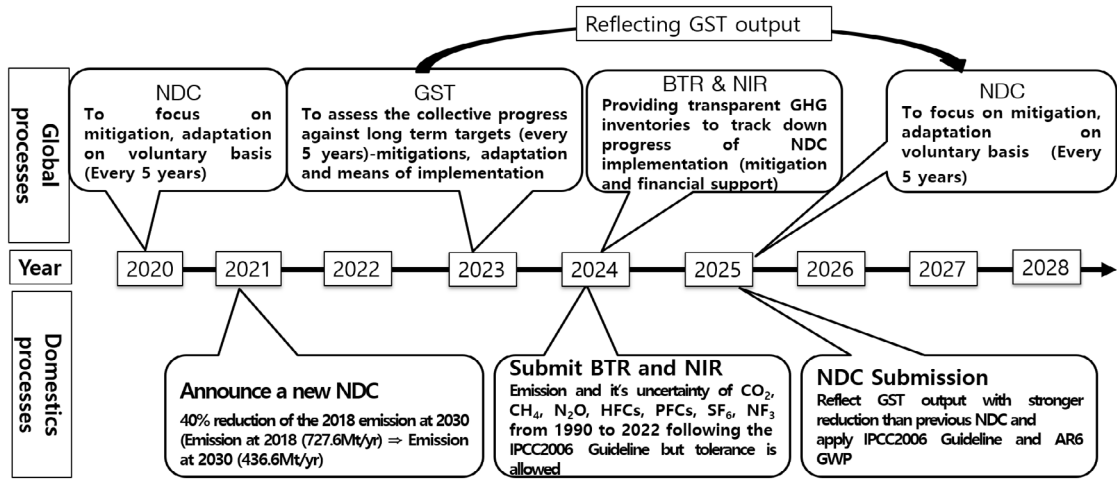


Fig. 1. Global processes and domestic processes in Korea under the Paris Agreement.

사례가 볼륨 1의 제 6장 품질보증/품질검사와 검증 (Quality Assurance/Quality Control and Verification)에 추가되었다. IG<sup>3</sup>IS는 UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)에 보고 되는 국가 배출량의 불확도 개선을 위한 신뢰도 높은 방안으로 제시되고 있다.

### 3.2 국가 인벤토리 개선 및 검증 활용

「2006 IPCC 가이드라인의 2019년 개정판」에 IG<sup>3</sup>IS가 추가되면서, 이미 주요 국가에서 NIR에 IG<sup>3</sup>IS를 활용하고 있다. 영국은 NIR의 부록에 하향식 배출량 결과를 수록하였다. 포함된 가스종은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, 수소불화탄소 (HFC-134a, HFC-125, HFC-143a, HFC-23, HFC-32, HFC-227ea, HFC-365mfc, HFC-245fa, HFC-152a, HFC-43-10mee), 과불화탄소 (PFC-14, PFC-116, PFC-218, PFC-318), 육불화황 (SF<sub>6</sub>), 삼불화질소 (NF<sub>3</sub>)로 교토의정서에 정의된 모든 온실가스이다. 각 가스종별로 관측시작 시점이 다르기 때문에 배출량 산정 기간 등에 차이가 있으나, 기본적으로 다음의 3가지 결과를 제시하고 있다. (1) 남반구(호주의 Cape Grim 관측소)와 북반구(영국의 Mace Head 관측소)에서 장기 관측된 1990년부터 2021년까지의 대기 농도의 시계열, (2) 1990년부터 2020년까지 연도

별 인벤토리 및 월별 하향식 방법으로 산정한 배출량과 불확도 시계열, (3) 최근 4년(2017~2020) 평균된 하향식 배출량의 공간분포이다. 주요 분석 결과로 HFC-134a의 하향식 배출량 대비 인벤토리 배출량의 과대 추정 원인을 분석하였고 그에 따른 인벤토리 배출 계수의 개선 결과를 소개하였다. 산업공정 부분의 품질보증/품질검사와 검증 분야에서 새로운 수소불화탄소 전망 모델(HFC Outlook)이 기존모델(ICF model)보다 개선되었는지를 알아보기 위하여 하향식 배출량을 활용하였다. 새로운 모델 결과가 하향식 배출량과 좀 더 유사하게 나오는 것을 근거로 개선되었다고 평가하였다. 또한 폐기물 분야에서 매립지에서의 메탄 인벤토리를 개선하기 위하여 하향식 배출량 자료를 활용한 결과를 소개하였다(United Kingdom, 2022). 또한 영국은 하향식 배출량 정보를 활용하여 불소화합물의 인벤토리 산정 방법을 개선하였다. 2015년에 1990년부터 2013년까지 불소화합물(HFC-134a) 인벤토리와 하향식 배출량 자료를 비교한 결과, 상향식으로 계산된 인벤토리가 하향식 배출량에 비해 매우 큰 값을 보이는 것을 발견하였다. 이에 인벤토리 개발자들과 하향식 배출량 개발자들이 협업을 통해 이러한 불일치를 발생시킨 요인을 분석하였다. 첫 번째 원인은 냉매 교체 주기인데, 인벤토리 계산 시 모

든 냉각기에 매년 냉매를 재주입하는 것으로 계산하였으나 실제로는 주기가 더 길다는 것을 발견하였다. 두 번째로 자동차의 에어컨 장착 여부에 대한 통계가 잘못된 것을 알아냈다. 이러한 연구를 바탕으로 에어컨과 냉각기의 배출계수 모델을 수정하고 2018년도에 1990년부터 2013년까지의 인벤토리를 갱신한 결과 하향식 배출량과 잘 일치하였다. 추가로 냉매 재주입 주기 등에 대한 통계자료를 개선하고 있다 (Manning *et al.*, 2018).

스위스는 국가 인벤토리 보고서에 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 두 종의 하향식 분석 결과를 수록하였다. CH<sub>4</sub>는 2013년부터 2020년까지 하향식 배출량을 산정하고, 인벤토리 배출량과의 유사성을 보임으로써 스위스 배출량의 신뢰성이 높다고 주장하였다. 또한 하향식 배출량 분석을 이용하여, EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research)의 (Crippa *et al.*, 2020) 스위스 국가 배출량이 과대 추정되고 있으며, 그 원인이 천연가스 분배망에서의 배출을 과대 추정했기 때문이라고 분석하였다. 하향식 배출량의 조밀한 공간 분포 특성을 이용하여, 농업지역과 도시지역을 구분하고 지역별 배출량의 차이를 비교하였다. 또한 하향식 배출량을 기반으로 겨울에 줄어들고 봄부터 여름까지 증가하는 계절 변동성을 발견하였고 이는 온도에 민감한 거름 처리나 젖소의 생산성이 계절에 의존하기 때문인 것으로 분석되었다. N<sub>2</sub>O는 2017년 이후의 분석 결과를 제시하였다. 하향식 배출량은 2017년부터 2019년까지  $11.0 \pm 1.4 \text{ Gg yr}^{-1}$ 이고 NIR은 2019년  $10.5 \pm 4.1 \text{ Gg yr}^{-1}$ 으로 심각한 차이는 없는 것으로 나타났다. 하향식 배출량은 불확도가 13%로 상향식 배출량의 불확도(38%)보다 작았다. N<sub>2</sub>O는 토양배출과 관련하여 계절변동이 매우 큰 것으로 나타났고, 여름에 가장 크고 겨울에 적게 나타났다 (Switzerland, 2022). 자국 인벤토리 신뢰도 확보 및 개선과 관련하여 스위스는 국가 인벤토리에서 CH<sub>4</sub>의 부문별 배출량이 달라진 경우, 하향식 결과와 비교를 통해 신뢰도를 확보했다 (Henne *et al.*, 2016). 또한 UNFCCC에 보고하는 인벤토리 배출량 결과가 제출연도에 따라

달라지는 경우, 하향식 배출량을 이용하여 어느 값이 타당한지를 주장하였다. 스위스는 2014년도에 2012년 메탄 배출량을  $176 \pm 28 \text{ Gg yr}^{-1}$ 으로 산정하였으나, 2015년에 재산정한 결과  $206 \pm 33 \text{ Gg yr}^{-1}$ 으로 증가되었다. 스위스는 배출 계수와 방법론의 개선으로 배출량을 좀 더 정확하게 산정하였다고 주장하였으나, 이에 대한 추가 증거가 필요했고, 이를 위해 하향식 배출량을 활용하였다. 2014년에 산정한 인벤토리를 선택값으로 2012년도 하향식 배출량을 계산한 결과가  $197 \pm 19 \text{ Gg yr}^{-1}$ 으로 2015년에 산정한 인벤토리와 더욱 유사하게 산출되었고, 이를 근거로 2015년에 산정한 인벤토리의 신뢰도가 높은 것으로 주장하였다 (Henne *et al.*, 2016).

호주는 2021년 NIR에 CH<sub>4</sub>와 관련하여 다양한 배출원의 특성을 이해하고, 국가 인벤토리 배출량 산정 방법의 지속적인 개선을 위해 하향식 배출량을 활용하였다. 구체적인 사례 분석 결과로 석탄광산, 탄층가스 추출, 소 사육장, 도축장, 하수 처리 등에 의한 메탄 발생이 강한 퀸즈랜드의 슈렛만 (Surat Basin)에서 하향식 배출량을 산정하고, 상향식 인벤토리와 10% 내로 일치함을 보였다. 이 비교 결과를 CH<sub>4</sub>의 국가 인벤토리 방법에 대한 품질보증의 증거로 제시하였다. 수소불화탄소류 (HFCs) 관련하여 1990년부터 관측을 개시한 타즈마니아에 위치한 Cape Grim 관측소 자료를 이용하여 하향식 배출량 자료를 산정하고, 국가 인벤토리의 품질보증 과정으로 상향식 국가 인벤토리 배출량 자료와 비교하였다 (Dunse *et al.*, 2018). 분석 초기에는 HFCs의 상향식과 하향식 배출량이 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 그 차이가 최근 커지고 있다는 것을 발견하였다. IPCC의 기본 유출률 대신 2018년 전문가들에 의해 제안된 장비별 유출률을 적용한 결과 그 차이가 2014년 이후 23% 정도로 줄었으나 여전히 그 차이는 적지 않고, 국가 추정치가 높은 값을 보이고 있다. 이러한 결과를 근거로 하여 HFCs 배출량에 대한 상향식 인벤토리에 대한 개선을 추진하고 있다 (Australian Department of Industry, Science, Energy and Resources, 2022).

뉴질랜드는 농업 분야의 발생원별 품질보증과 품질 검사 및 검증에서 하향식 배출량을 이용하고 있고, 농업 인벤토리의 신뢰도 개선 및 계절과 연변동을 포함한 배출량 변동 파악에 하향식 배출량이 유용하다고 제시하였다(New Zealand, 2022). 뉴질랜드는 반추동물의 CH<sub>4</sub> 배출을 추정하는 국가 고유 배출계수를 개발하기 위해 노력하고 있다. 개발된 기술의 효용성 검증을 위해 하향식 방법을 활용하고 있으며, CH<sub>4</sub> 관측망이 확보된 남섬에서의 하향식 배출량 추정치와 인벤토리가 유사하다고 밝혔다(New Zealand, 2022). 하향식 방법을 개선하기 위해 뉴질랜드에 현재 2개인 CH<sub>4</sub> 관측소를 8개로 늘릴 계획이고, 지상관측이 곤란한 지역에서 배출량을 분석하는 데 위성관측이 유용할 것으로 제시하였다(New Zealand, 2022). 또한 뉴질랜드는 하향식 배출량 분석을 통해 남섬의 남서지역 산림에서 지면의 CO<sub>2</sub> 생태계 흡수량 증가(약 3배)를 발견하고 인벤토리 개선을 추진하였다(Steinkamp *et al.*, 2017).

독일은 NIR의 부록 6에 인벤토리 배출량의 검증 정보로 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O에 대한 연도별 하향식 배출량 값의 공간분포도, 인벤토리 배출량과 하향식 배출량의 시계열 비교도, 인벤토리와 하향식 배출량의 시간에 따른 상관관계를 수록하였다. 이러한 비교 결과로부터 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>는 상향식과 하향식 배출량이 유사하여 독일 국가 배출량의 신뢰도가 높으나 N<sub>2</sub>O는 차이가 크게 나타나고 있어 향후 개선이 필요하다고 제시하였다(Germany, 2022).

그 외에도 미국은 농업 분야 CH<sub>4</sub> 배출량이 과소추정되는 것을 발견하고 관련 인벤토리를 개선하였으며(Miller *et al.*, 2013), 인도도 하향식과 상향식 배출량의 결과가 유사함을 보이고, 이를 근거로 NIR의 신뢰도를 주장하였다(Ganesan *et al.*, 2017).

### 3.3 국외 유입 감시 및 기후 외교 활용

온실가스는 상대적으로 반응성이 낮고, 대기의 흐름에 따라 장거리를 이동하기 때문에, 국경이 없다. 인접국가 간의 배출량은 명확하게 구분되지 않고, 각 국

가의 배출량이 제대로 산정되지 않는 경우 풍하측에 위치한 국가의 배출량이 증가하는 것으로 잘못 분석하게 된다. 고의든 실수든 주변국의 배출량이 잘못 산정된 경우, 국내 온실가스 농도를 이용하여, 배출원을 과학적으로 규명해 내는 과정은 매우 중요하다. 특히 미래에 온실가스에 의한 기후위기가 심화되면 국가별 온실가스 배출량에 대한 분쟁은 더욱 심해질 것이고, 이에 대한 외교적 대응을 위해 과학적인 관측과 모델링을 통한 정확한 국가별 온실가스 배출량 정보를 확보하고 대응하는 것은 매우 중요하다. 국가 내 온실가스 농도 증가의 원인과 관련하여 주변국의 배출량에 따른 영향을 분석하는 과학적 방법으로 IG<sup>3</sup>IS을 활용할 수 있다. 최근의 대표적인 예로, 제주도 고산의 CFC-11 농도 증가가 중국의 CFC-11 과다 배출과 관련되어 있다는 것을 분석함으로써 이를 해결하였다(Park *et al.*, 2021). 스위스는 고산지역인 융프라우요 후 관측소에서 HFC-23이 증가하는 것을 발견하였고, 풍계 분석을 이용한 역추적으로 이탈리아의 고농도 배출원을 발견하고, 해당 가스의 인벤토리를 수정하도록 협의하였다(Brunner *et al.*, 2018).

외국기관에서 자국의 배출량을 과다하게 산정한 경우에도 대응이 가능하다. 유럽연합에서 매년 발간하는 EDGAR 자료는 스위스의 메탄 배출량을 2012년에 228.2 Gg으로 발표하였다. 그러나 스위스 국내에서 산정한 인벤토리는 183 Gg으로 두 자료 간에 큰 차이가 났다. 어느 자료가 맞는지 판단하기 위해, EDGAR 자료 및 국내 인벤토리를 선협값으로 하향식 배출량을 각각 산정한 결과 EDGAR 자료가 과대 추정된 것으로 분석되었다. 배출량에 대한 추가 분석을 통해 EDGAR 자료에서 스위스 도시에서의 메탄 유출과 활용 계수가 과대 산정되었다는 점을 발견하였고, EDGAR 자료 생산기관에 요청하여 과도하게 산정되는 배출량을 개선할 수 있었다(Henne *et al.*, 2016).

### 3.4 온실가스 감축 기회 발견 및 정책 평가 활용

미국은 하향식 배출량을 활용하여 시설 단위에서 누락된 온실가스 배출을 확인하고 이에 대한 조치를

통해 온실가스 감축에 기여하였다. 대표적인 예로 상향식과 하향식 배출량의 차이로부터 배출량 산정에서 일부 지역의 발전소가 제외되었음을 발견하고 누락된 발전소를 추가하였다. 또한 국가 전체에 대하여 전수 조사를 시행하여 누락된 발전소를 모두 포함하였고, 이 정보를 토대로 하여 배출량 감축을 추진하게 되었다(WMO, 2018). 또한 일부 시설에서 하향식으로 산정한 CH<sub>4</sub> 배출량이 보고된 배출량에 비해 크게 증가하는 것을 발견하고 집중 조사한 결과 천연가스 누출을 발견하였고, 이에 따른 수송 시스템을 개선하여 배출량을 줄였다(WMO, 2018). 미국의 셰일가스 생산 지역의 온실가스 배출량이 하향식으로 산출한 결과에 비해 과소 평가된 결과를 분석하여 일부 시설이 누락된 것을 발견하고 시스템 개선을 통해 온실가스 감축에 기여하였다(Alvarez *et al.*, 2012). 미국 캘리포니아 주는 매립지의 CH<sub>4</sub> 배출 핫스팟을 발견하고 지면 피폭을 개선함으로써 CH<sub>4</sub> 배출량을 감축하게 되었다(Cusworth *et al.*, 2020).

미국은 석탄에서 천연가스로 에너지원 전환을 추진하고 있으며, 이러한 정책에 따른 배출량 감소 효과를 확인하기 위하여 하향식 배출량을 활용하였다(WMO, 2018). 또한 영국은 북부지역의 아디핀산공업 단지에 도입된 청정기술에 의한 N<sub>2</sub>O 감축 효과를 검

증하는 데 하향식 배출량을 활용하였다(IPCC, 2019).

#### 4. 기상청의 개발 현황 및 계획

국립기상과학원은 2009년부터 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)에서 개발된 Carbon Tracker를 기반으로 동아시아 지역에 대한 CO<sub>2</sub> 분석 체계를 개발하였으나, 인위적 배출량은 분석되지 않는다는 단점이 있었다(Kim *et al.*, 2014). 또한 입력 정보가 국외 기관에 의존적이라 독자적인 운영체계를 갖추기 어려웠다. 그 외에 Park *et al.* (2021)은 CFC-11의 대기 농도 증가에 대하여 하향식 분석법을 적용하여 그 배출원이 중국 산동지역이라는 것을 발견하였으나, 실시간 현업 운영체계는 아니다.

기상청은 현업에서 실시간 운영되는 기상예보모델인 Korea Integrated Model (KIM) (Hong *et al.*, 2018)과 국제적으로 품질이 입증된 기후변화감시소의 장기 관측자료(Lee *et al.*, 2019)를 기반으로 IG<sup>3</sup>IS를 개발하는 INVERSE-KOREA 사업을 추진하게 되었고, 2021년에 WMO의 공식 IG<sup>3</sup>IS 사업으로 승인을 받게 되었다. INVERSE-KOREA는 2023년까지 역변환모델

**Table 1.** Information on the greenhouse gas in-situ measurements operated by Korea Meteorological Administration in Korea.

Station (ID)	Longitude Latitude	Inlet height (period)	Species (period)
Anmyeondo (AMY)	126.32°E 36.53°N	20 m (1999~2004) 40 m (since 2004)	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , CFCs (since 1999) <sup>12,13,14</sup> C in CO <sub>2</sub> (since 2014) <sup>12,13</sup> C in CH <sub>4</sub> (since 2014)
Gosan (GSN)	126.16°E 33.30°N	6 m (2012~2017) 12 m (since 2017)	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> (since 2012)
UlleungdoDokdo (ULD)	130.90°E 37.48°N	10 m (since 2012)	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> (since 2014)
Boseong Tower (BST)	127.21°E 34.76°N	300 m and 140 m	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> (since 2021)
Lotte World Tower (LWT)	126.67°E 37.46°N	555 m building above ground	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , <sup>12,13,14</sup> C in CO <sub>2</sub> , <sup>12,13</sup> C in CH <sub>4</sub> (since 2022)



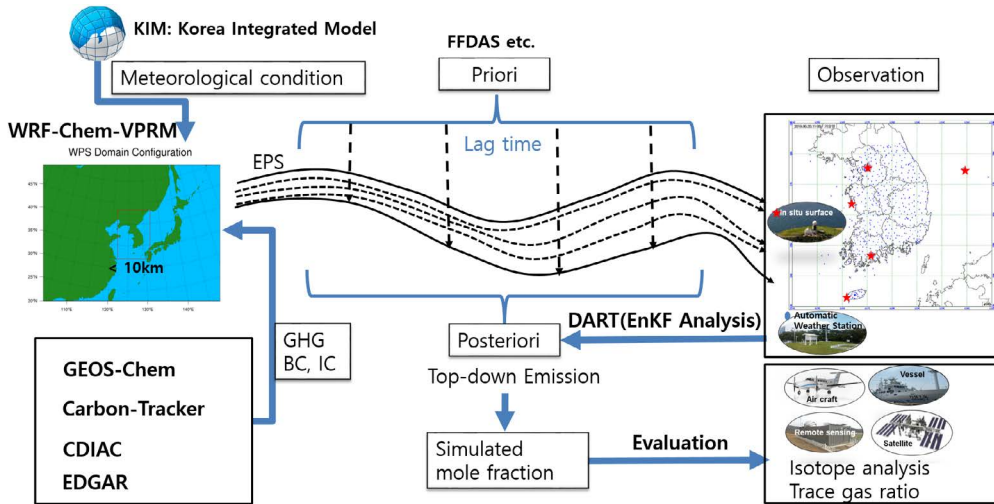


Fig. 2. Schematic diagram of the target system of the INVERSE-KOREA.

링 체계를 완성하고, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>에 대하여 순차적으로 개발을 진행할 예정이다. 관측자료는 기상청이 운영하는 안면도, 고산, 울릉도·독도 기후변화 감시소 관측자료를 활용하되, 새롭게 구축된 보성타워 관측자료와 롯데월드타워 관측자료는 품질검사과정을 거쳐 불확도 산정 이후 활용할 예정이다. 활용 예정인 관측자료의 특성은 표 1에 보였다. 또한 선박과 항공기, 지상원격장비에서 관측되는 온실가스도 모델 검증에 활용될 예정이다.

그림 2에 INVERSE-KOREA에서 목표하는 운영체계 모식도를 보였다. 역모델링에 사용되는 기상장의 초기조건과 측면 경계조건은 KIM을 활용한다. 다만 현업 모델인 KIM은 성능개선을 위해 지속적으로 업데이트가 되므로, 개발 초기에는 재분석자료를 활용하고, 현업 운영단계에서 KIM을 적용할 계획이다. 역변환과 자료동화 체계는 WRF-Chem/DART (Weather Research and Forecasting with Chemical module/Data Assimilation Research Testbed)를 사용하도록 설계하였다. WRF-Chem/DART의 상세한 내용은 Zhang *et al.* (2021)을 참고하기 바란다. 식생에 의한 광합성과 호흡에 따른 온실가스의 변화를 모의하기 위하여 Vegetation Photosynthesis and Respiration Model

(VPRM)을 접목하였다(Hu *et al.*, 2021; Mahadevan *et al.*, 2008). 지자체 수준의 상세 배출량 분석이 가능하도록 수평 분해능은 10 km 이내로 울릉도·독도 관측 지점을 포함하는 한반도 영역으로 역모델링 영역을 구성하였다. 특히 행성계층 내의 바람장 정확도를 높이기 위해, 지면과정이 개선된 WRF 버전을 적용하였다(Lee *et al.*, 2020).

INVERSE-KOREA는 월별로 지면 플럭스를 갱신하는 준 실시간 운영체제로 개발하여, 국가 인벤토리 개선을 위한 과학적 정보를 지원할 예정이다. 준 실시간 운영이 가능하도록 기상청에서 실시간 생산되는 온실가스 관측자료와 기상모델 결과를 활용하고, 온실가스의 초기조건과 경계조건은 EDGAR, Carbon-Tracker, GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System coupled with Chemistry), CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center)와 같은 전 지구 규모의 독립적인 모델에서 산출한 정보를 사용한다(Crippa *et al.*, 2020; Janssens-Maenhout *et al.*, 2017; Andres *et al.*, 2016; Shim *et al.*, 2013; Peter *et al.*, 2005). 일반적으로 전 지구 규모 배출량 정보의 갱신은 장기간이 소요되므로 분석시점에 맞는 최신의 선형값 활용이 곤란하다. 따라서 INVERSE-KOREA는 FFDAS (Fossil

Fuel Data Assimilation System) (Asefi-Najafabady *et al.*, 2014)와 같은 과거 자료를 선협값으로 활용하되, 영국기상청과 같이 선협값 오차를 크게 부여하여 관측 정보의 가중치가 높도록 분석하는 방식으로 구성하였다(Manning *et al.*, 2011). 다만 과거의 자료를 사용하더라도, 일 변동 및 계절 변동을 잘 표현하도록 계절 및 일변화 특성이 반영되도록 하였다(Nassar *et al.*, 2013).

INVERSE-KOREA 사업을 통해 한반도 영역에서 10km 수준의 격자로 월별 온실가스 플럭스를 산출하고, 분석된 온실가스 플럭스에 전방모델을 적용하여 3차원의 대기 중 온실가스 농도를 산출하고자 한다. 2023년까지 2019년도에 대한 하향식 온실가스 정보를 생산하고, 우리나라가 NIR을 제출하는 2024년에는 2019년부터 2022년까지 3개년에 대한 하향식 온실가스 분석 정보를 생산할 예정이다. 2026년까지 준 실시간 운영체계를 안정화시키고, 국내 관측자료가 확보되어 있는 과거 기간(CO<sub>2</sub>는 1999년부터, CH<sub>4</sub>와 SF<sub>6</sub>는 2012년부터)에 대하여 월 단위 하향식 분석 정보를 매년 갱신할 예정이다. 2026년 이후에는 N<sub>2</sub>O를 포함하여 불소화합물 온실가스 등 교토의정서에 정의된 모든 온실가스로 확대할 예정이다.

## 5. 결론 및 제언

WMO는 지난 10여 년간 수치모델 성능의 획기적인 발전과 대기 중 장기 온실가스 관측자료의 정확도 개선을 근거로, 국가 온실가스 배출량의 신뢰도 개선에 IG<sup>3</sup>IS를 활용하도록 회원국을 독려하고 있다. 또한 국가 인벤토리 보고서의 온실가스 배출량 산정 방법을 규정하는 「2006 IPCC 가이드라인의 2019년 개정판」에 온실가스 배출량의 품질보증/품질검사와 검증 방법으로 IG<sup>3</sup>IS가 추가되었고, 이미 영국을 포함한 다수의 국가들이 2022년에 제출된 NIR에 온실가스 배출량 검증 자료로서 IG<sup>3</sup>IS 결과를 포함하고 있다.

우리나라도 파리협정에 따른 신기후 체제하에서

2024년부터 NIR을 제출해야 하고, 이와 관련하여 국가 배출량에 대한 신뢰도 확보를 위해 독립적인 배출량 검증 방법인 IG<sup>3</sup>IS의 적용이 필요한 상황이다. 이에 기상청은 세계기상기구와 함께 한반도 영역에 대한 IG<sup>3</sup>IS 개발과 준 실시간 현업 운영체계를 구축하는 INVERSE-KOREA 사업을 추진하고 있으며, 국가 인벤토리 보고서가 작성되는 2024년에는 우리나라에 대한 IG<sup>3</sup>IS를 현업 운영할 계획이다.

지금까지 국내외 IG<sup>3</sup>IS 활용 사례를 조사한 결과, IG<sup>3</sup>IS는 인벤토리 개선과 검증, 해외유입 및 기후 외교, 정책효과와 과학적 지원, 새로운 감축 기회의 발견 등에서 주로 활용되는 것으로 분석되었다(그림 3). 이러한 분석 결과와 INVERSE-KOREA의 특성을 기반으로 향후 다음과 같은 분야에서 관련 연구기관과 INVERSE-KOREA 결과의 활용 및 협력을 제안하고자 한다.

첫 번째로 기후변화에 따라 변화하는 자연적 기원의 온실가스 배출과 흡수 정보에 대한 연구 분야이다. 인위적인 CO<sub>2</sub> 배출량은 그동안 상향식 배출량 산정 방법의 개선을 통해 그 불확도가 10% 이내로 정확도가 높아졌다(Minx *et al.*, 2021; Choulga *et al.*, 2020). 그러나 Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF)와 같은 자연적 기원에 의한 배출량의 신뢰도는 아직까지 매우 낮다(Minx *et al.*, 2021). 특히 기후변화에 따른 기온상승으로 자연적 배출 및 흡수량의 변화가 점차 커질 것으로 예상되어 하향식 배출량 산정이 점차 중요해질 것이다. 그 예로 2007년 이후 대기 중 CH<sub>4</sub>의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있는데 이는 인위적 기원과 더불어 자연적 기원에 의한 것으로 분석되고 있다(Feng *et al.*, 2022; Lan *et al.*, 2021). 기후변화가 가속화되는 상황에서 온실가스에 대한 기후반응(Climatic feedback)을 포함한 총체적인 기후위기 대응을 위해서는 기상조건의 영향을 받는 자연적인 흡수/배출량이 모두 포함되는 IG<sup>3</sup>IS 결과는 매우 유용한 정보가 될 것이다.

두 번째로 CO<sub>2</sub> 이외의 온실가스에 대한 배출/흡수 정보 개선과 관련된 연구 분야이다. 인위적인 CO<sub>2</sub> 배

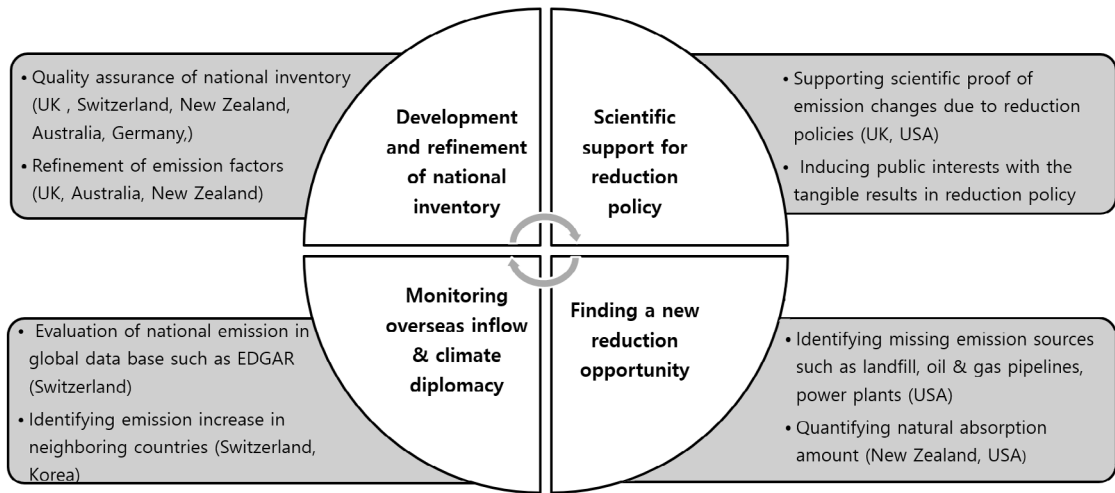


Fig. 3. Summary of the usage of IG<sup>3</sup>IS products.

출량의 불확도는 상대적으로 낮지만, CH<sub>4</sub>이나 N<sub>2</sub>O 배출량의 불확도는 매우 높다. 스위스의 경우 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O 불확도는 전체 온실가스 불확도의 98%를 차지하고 있다(Henne *et al.*, 2018). 특히 우리나라는 벼농사 경작지역이 넓게 분포하고 있어, CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 배출량도 중요하다. 향후 IG<sup>3</sup>IS 정보는 이들 요소의 불확도를 개선하는 데 중요한 역할을 할 수 있고 이를 통해 CO<sub>2</sub> 이외의 온실가스에 의한 지구온난화의 영향을 파악하는 데 도움을 줄 수 있다.

세 번째는 소규모 배출원이나 간헐적인 배출원의 영향에 대한 연구 분야이다. 대기수송모델을 활용하는 IG<sup>3</sup>IS는 기류가 흘러가는 지역의 모든 배출원 정보를 포함하므로, 소규모 배출원이나 간헐적인 배출원의 누락 문제를 해결할 수 있다. 또한 준 실시간으로 배출량을 갱신하게 되므로 변화되는 배출 정보를 신속하게 감지할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 결과를 이용하면, 기존의 감축 정책에 추가하여 온실가스의 새로운 감축 기회를 찾아낼 수 있을 것이다.

네 번째로 지자체 단위 배출량의 총합과 국가 총배출량의 차이가 있는 경우 그 원인을 분석하는 데 IG<sup>3</sup>IS를 활용할 수 있다. 상향식 배출량만 활용하는 경우 지자체 배출량의 총합과 국가 총배출량에서 많

은 차이가 발생할 수 있다. 그러나 하향식 배출량은 모든 배출원의 정보를 포함하므로, 국가배출량은 지자체별로 분할되는 배출량의 총합과 동일하다. 따라서 지자체별 하향식 배출량과 상향식 배출량의 차이를 분석하면, 지자체별 배출량 산정을 보완하거나 시계열 변동성 등 지역적 배출 특성을 이해하는 데 도움을 줄 수 있다.

다섯 번째로 상향식과 하향식 배출량의 차이는 배출량 신뢰도 확보를 위한 기술개발의 우선 순위 설정 시 활용할 수 있다. 상향식과 하향식 배출량의 차이가 큰 지역이나, 온실가스 중에 대하여 우선적으로 배출량 산정 방법의 개선을 검토해야 한다. 이는 상향식 방법은 물론 하향식 방법에 대한 개선의 효과를 얻을 수 있고, 장기적으로 국가 전체의 배출량 불확도를 줄이는 데 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

마지막으로 국내의 배출량 감축 성과를 과학적으로 입증하는 데 상향식 배출량과 하향식 배출량의 일치성을 활용할 수 있다. 우리나라와 중국, 일본을 포함하는 동아시아는 주요한 온실가스 배출 지역이다. 특히 국가별 상향식 배출량과 하향식 배출량에서 차이는 경우, 해당 국가의 배출량에 대한 신뢰도에 의문을 제기할 수 있다. 따라서 IG<sup>3</sup>IS를 이용하여 국내에

서의 배출량과 주변국의 배출량을 구분하는 과학적 정보를 확보하는 것이 필요하다. 한반도의 대기 중 온실가스 농도 관측자료를 이용한 하향식 온실가스 기원 추적 정보로부터 국외 유입분과 국내 산출분을 과학적으로 구분하는 작업은 국내 온실가스 감축 성과의 입증은 물론, 국가 간 배출량 관련 분쟁 발생 시 외교적 대응을 위한 중요한 과학적 자료로 그 의미가 매우 크다.

상향식과 하향식 배출량은 모두 완벽하지 않기에, 상호 보완을 통해 좀 더 신뢰도 높은 배출량 산정이 가능하므로, 인벤토리 작성 시 하향식과 상향식 배출량 산정 그룹 간 협업이 매우 중요하다. 만약 상향식과 하향식 배출량의 차이가 크게 나는 경우 인벤토리 개발자와 하향식 모델 개발자 간의 논의를 통해 그 차이를 좁혀가면서 상향식 배출 방법의 개선은 물론 하향식 배출량 산정 방법의 문제점 파악 및 개선도 가능하고, 지속적으로 국가 배출량의 신뢰도를 높이는 데 기여할 수 있을 것이다. 이를 통해서 향후 과학적인 자료에 기반한 기후위기 감시와 대응이 가능할 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기후·기후변화 예측기술 지원 및 활용연구」(KMA2018-00324)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Agustí-Panareda, A., Diamantakis, M., Massart, S., Chevallier, F., Muñoz-Sabater, J., Barré, J., Curcoll, R., Engelen, R., Langerock, B., Law, R.M., Loh, Z., Morgui, J.A., Parrington, M., Peuch, V.-H., Ramonet, M., Roehl, C., Vermeulen, A.T., Warneke, T., Wunch, D. (2019) Modelling CO<sub>2</sub> weather - why horizontal resolution matters, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 7347-7376. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7347-2019>
- Alvarez, R.A., Pacala, S.W., Winebrake, J.J., Chameides, W.L., Hamburg, S.P. (2012) Greater focus needed on methane leakage from natural gas infrastructure, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(17), 6435-6440.
- Andres, R.J., Boden, T.A., Marland, G. (2016) Monthly Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions: Mass of Emissions Gridded by One Degree Latitude by One Degree Longitude. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. <https://doi.org/10.3334/CDIAC/ffe.MonthlyMass.2016>
- Asefi-Najafabady, S., Rayner, P.J., Gurney, K.R., McRobert, A., Song, Y., Coltin, K., Huang, J., Elvidge, C., Baugh, K. (2014) A multi year, global gridded fossil fuel CO<sub>2</sub> emission data product: Evaluation and analysis of results, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 10213-10231. <https://doi.org/10.1002/2013JD021296>
- Australian Department of Industry, Science, Energy and Resources (2022) National Inventory Report 2020 Volume I, 432pp. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/aus-2022-nir-27may22.zip1> (accessed on May 27, 2022).
- Bauer, P., Thorpe, A., Brunet, G. (2015) The quiet revolution of numerical weather prediction, *Nature*, 525, 47-55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>
- Bréon, F.M., Broquet, G., Puygrenier, V., Chevallier, F., Xueref-Remy, I., Ramonet, M., Dieudonne, E., Lopez, M., Schmidt, M., Perrussel, O., Ciais, P. (2015) An attempt at estimating Paris area CO<sub>2</sub> emissions from atmospheric concentration measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 1707-1724. <https://doi.org/10.5194/acp-15-1707-2015>
- Brunner, D., Henne, H., Reimann, S., Steinbacher, M., Mohn, J., Emmenegger, L. (2018) Top-down emission estimation to support national inventories A Swiss perspective, *First IG<sup>3</sup>IS Symposium*, Geneva 13-15 Nov 2018.
- Choulga, M., Janssens-Maenhout, G., Balsamo, G., McNorton, J., Solazzo, E., Bousseret, N., Agustí-Panareda, A. (2020) Anthropogenic CO<sub>2</sub> emission uncertainties, EGU General Assembly 2020, Online, 4-8 May 2020, EGU2020-10560. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10560>
- Crippa, M., Solazzo, E., Huang, G., Guizzardi, D., Koffi, E., Muntean, M., Schieberle, C., Friedrich, R., Janssens-Maenhout, G. (2020) High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research, *Scientific Data*, 7(1), 121. <https://doi.org/10.1038/s415>

- 97-020-0462-2
- Cusworth, D., Duren, R., Thorpe, A., Stavros, N., Bue, B., Tapella, R., Yadav, V., Miller, C. (2020) A multi-tiered methane analytic framework for constraining budgets, point source attribution, and anomalous event detection, EGU General Assembly 2020, Online, 4-8 May 2020, EGU2020-6281. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-6281>
- Dunse, B., Derek, N., Fraser, P., Krummel, P., Steele, P. (2018) Australian and Global Emissions of Ozone Depleting Substances. Aspendale: CSIRO Oceans and Atmosphere. <http://hdl.handle.net/102.100.100/86814?index=1>
- Feng, L., Palmer, P.I., Zhu, S., Parker, R.J., Liu, Y. (2022) Tropical methane emissions explain large fraction of recent changes in global atmospheric methane growth rate, *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28989-z>
- Ganesan, A.L., Rigby, M., Lunt, M.F., Parker, R.J., Boesch, H., Goulding, N., Umezawa, T., Zahn, A., Chatterjee, A., Prinn, R.G., Tiwari, Y.K., van der Schoot, M., Krummel, P.B. (2017) Atmospheric observations show accurate reporting and little growth in India's methane emissions, *Nature Communications*, 8(1), 836. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00994-7>
- Germany (2022) National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2020, Federal Environment Agency, Germany, 1042pp. [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/deu-2022-nir-14apr22\\_0.zip](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/deu-2022-nir-14apr22_0.zip) (accessed on May 27, 2022)
- Henne, S., Brunner, D., Oney, B., Leuenberger, M., Eugster, W., Bamberger, I., Meinhardt, F., Steinbacher, M., Emmenegger, L. (2016) Validation of the Swiss methane emission inventory by atmospheric observations and inverse modelling, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3683-3710. <https://doi.org/10.5194/acp-16-3683-2016>
- Henne, S., Mohn, J., Leuenberger, M., Meinhardt, F., Steinbacher, M., Vollmer, M.K., Reimann, S., Emmenegger, L., Brunner, D. (2018) Top-down Validation of Swiss non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions, *TRANSCOM/IG<sup>3</sup>IS*, Lund, 2018-09-19, [https://ane4bf-datap1.s3.eu-west-1.amazonaws.com/wmod8\\_ig3is/IG3IS/Presentations/Henne\\_IG3IS\\_TRANSCOM\\_Lund\\_Sweden.pdf?r9fhqeHDraoXh2bnLkLsNblbkgIK5bp=](https://ane4bf-datap1.s3.eu-west-1.amazonaws.com/wmod8_ig3is/IG3IS/Presentations/Henne_IG3IS_TRANSCOM_Lund_Sweden.pdf?r9fhqeHDraoXh2bnLkLsNblbkgIK5bp=)
- Hong, S.-Y., Kwon, Y.C., Kim, T.-H., Kim, J.-E.E., Choi, S.-J., Kwon, I.-H., Kim, J., Lee, E.-H., Park, R.-S., Kim, D.-I. (2018) The Korean Integrated Model (KIM) System for Global Weather Forecasting, *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Science*, 54(S1), 267-292. <https://doi.org/10.1007/s13143-018-0028-9>
- Hu, X.-M., Gourdji, S.M., Davis, K.J., Wang, Q., Zhang, Y., Xue, M., Feng, S., Moore, B., Crowell, S.M.R. (2021) Implementation of improved parameterization of terrestrial flux in WRF-VPRM improves the simulation of nighttime CO<sub>2</sub> peaks and a daytime CO<sub>2</sub> band ahead of a cold front, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD034362. <https://doi.org/10.1029/2020JD034362>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1: General Guidance and Reporting, Ch6 QUALITY ASSURANCE/QUALITY CONTROL AND VERIFICATION, IPCC, Switzerland. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1\\_Volume1/V1\\_6\\_Ch6\\_QA\\_QC.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_6_Ch6_QA_QC.pdf)
- Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., Bergamaschi, P., Pagliari, V., Olivier, J.G.J., Peters, J.A.H.W., van Aardenne, J.A., Monni, S., Doering, U., Petrescu, A.M.R. (2017) EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970-2012, *Earth System Science Data [preprint]*. <https://doi.org/10.5194/essd-2017-79>.
- Janssens-Maenhout, G., Pagliari, V., Guizzardi, D., Muntean, M. (2013) Global emission inventories in the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) - Manual (I): Gridding: EDGAR emissions distribution on global grid-maps, JRC Technical Report, Joint Research Centre. <https://doi.org/10.2788/81454>
- Kim, J., Kim, H., Cho, C.-H. (2014) The effect of optimization and the nesting domain on carbon flux analyses in Asia using a carbon tracking system based on the ensemble Kalman filter, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(3), 327-344.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2020) WMO Technical Progress Report on the Global Data-Processing and Forecasting System (GDPPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research 2020, Korea Meteorological Administration, Korea, 22p. <https://wmoomm.sharepoint.com/:b/s/wmocpdb/EfZDbXuCO6hKj5fk9qf1LoBnAt-GDYW79LWv3lZgG8i6A?e=gtrUeJ>
- Lan, X., Nisbet, E.G., Dlugokencky, E.J., Michel, S.E. (2021) What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH<sub>4</sub> observations and the way forward, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020>

- 0440
- Lauvaux, T., Miles, N.L., Deng, A., Richardson, S.J., Cambaliza, M.O., Davis, K.J., Gaudet, B., Gurney, K.R., Huang, J., O'Keefe, D., Song, Y., Karion, A., Oda, T., Patarasuk, R., Razlivanov, I., Sarmiento, D., Shepson, P., Sweeney, C., Turnbull, J., Wu, K. (2016) High-resolution atmospheric inversion of urban CO<sub>2</sub> emissions during the dormant season of the Indianapolis Flux Experiment (INFLUX), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 5213-5236. <https://doi.org/10.1002/2015JD024473>
- Lee, H., Han, S.-O., Ryoo, S.-B., Lee, J.-S., Lee, G.-W. (2019) The measurement of atmospheric CO<sub>2</sub> at KMA/GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 2149-2163. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2149-2019>
- Lee, J., Hong, J., Noh, Y., Jimenez, P.A. (2020) Implementation of a roughness sublayer parameterization in the Weather Research and Forecasting model (WRF version 3.7.1) and its evaluation for regional climate simulations, *Geoscientific Model Development*, 13, 521-536. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-521-2020>
- Liu, Z., Guan, D., Wei, W., Davis, S.J., Ciais, P., Bai, J., Peng, S., Zhang, Q., Hubacek, K., Marland, G., Andres, R.J., Crawford-Brown, D., Lin, J., Zhao, H., Hong, C., Boden, T.A., Feng, K., Peters, G.P., Xi, F., Liu, J., Li, Y., Zhao, Y., Zeng, N., He, K. (2015) Reduced Carbon Emission Estimates from Fossil Fuel Combustions and Cement Production in China, *Nature*, 524, 335-338. <https://doi.org/10.1038/nature14677>
- Mahadevan, P., Wofsy, S.C., Matross, D.M., Xiao, X., Dunn, A.L., Lin, J.C., Gerbig, C., Munger, J.W., Chow, V.Y., Gottlieb, E.W. (2008) A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2), GB2005. <https://doi.org/10.1029/2006GB002735>
- Manning, A.J., O'Doherty, S., Jones, A.R., Simmonds, P.G., Derwent, R.G. (2011) Estimating UK methane and nitrous oxide emissions from 1990 to 2007 using an inversion modeling approach, *Journal of Geophysical Research*, 116, D02305. <https://doi.org/10.1029/2010JD014763>
- Manning, A.J., Redington, A., O'Doherty, S., Stanley, K., Rigby, M., Young, D., Simmonds, P., Rennick, C., Arnold, T., Wisher, A. (2018) Use of inverse modelling (InTEM) to support UK inventory reporting, WMO IG<sup>3</sup>IS Symposium, Geneva, November 2018. [https://ane4bf-datap1.s3.eu-west-1.amazonaws.com/wmod8\\_ig3is/IG3IS/Presentations/Manning\\_IG3IS\\_Symposium\\_Geneva\\_Switzerland.pptx?Htdr3OGgm\\_\\_e4Q0iVP4rTRLwafslEI19=](https://ane4bf-datap1.s3.eu-west-1.amazonaws.com/wmod8_ig3is/IG3IS/Presentations/Manning_IG3IS_Symposium_Geneva_Switzerland.pptx?Htdr3OGgm__e4Q0iVP4rTRLwafslEI19=)
- Miller, S., Wofsy, S., Michalak, A., Kort, E., Andrews, A., Biraud, S., Dlugokencky, E., Eluszkiewicz, J., Fischer, M., Janssens-Maenhout, G., Miller, B., Miller, J., Montzka, S., Nehrkorn, T., Sweeney, C. (2013) Anthropogenic emissions of methane in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(50), 20018-20022. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314392110>
- Minx, J.C., Lamb, W.F., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Crippa, M., Dobbeling, N., Forster, P.M., Guizzardi, D., Olivier, J., Peters, G.P., Pongratz, J., Reisinger, A., Rigby, M., Sausnois, M., Smith, S.J., Solazzo, E., Tian, H. (2021) A comprehensive dataset for global, regional and national greenhouse gas emissions by sector 1970-2018 with an extension to 2019, *Earth System Science Data*, 13, 5213-5252. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5213-2021>
- Nassar, R., Napier-Linton, L., Gurney, K.R., Andres, R.J., Oda, T., Vogel, F.R., Deng, F. (2013) Improving the temporal and spatial distribution of CO<sub>2</sub> emissions from global fossil fuel emission data sets, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 917-933. <https://doi.org/10.1029/2012JD018196>
- New Zealand (2022) 1990-2020 New Zealand's Greenhouse Gas Inventory Volume 1, Ministry for the Environment, New Zealand, 531pp. [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/nzl-2022-nir-14apr22\\_0.zip](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/nzl-2022-nir-14apr22_0.zip)
- Park, S., Western, L.M., Saito, T., Redington, A., Henne, S., Fang, X., Prinn, R.G., Manning, A.J., Montzka, S.A., Fraser, P.J., Ganesan, A.L., Harth, C.M., Kim, J., Krummel, P.B., Liang, Q., Muhle, J., O'Doherty, S., Park, H., Park, M.-K., Reimann, S., Salameh, P.K., Weiss, R.F., Rigby, M. (2021) A decline in emissions of CFC-11 and related chemicals from eastern China, *Nature*, 590(7846), 433-437. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03277-w>
- Peters, W., Miller, J.B., Whitaker, J., Denning, A.S., Hirsch, A., Krol, M.C., Zupanski, D., Bruhwiler, L., Tans, P.P. (2005) An ensemble data assimilation system to estimate CO<sub>2</sub> surface fluxes from atmospheric trace gas observations, *Journal of Geophysical Research*, 110, D24304. <https://doi.org/10.1029/2005JD006157>
- Shim, C., Lee, J., Wang, Y. (2013) Effect of continental sources and sinks on the seasonal and latitudinal gradient of atmospheric carbon dioxide over East Asia, *Atmospheric Environment*, 79, 853-860. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.055>

- Steinkamp, K., Mikaloff Fletcher, S.E., Brailsford, G., Smale, D., Moore, S., Keller, E.D., Baisden, W.T., Mukai, H., Stephens, B.B. (2017) Atmospheric CO<sub>2</sub> observations and models suggest strong carbon uptake by forests in New Zealand, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 47-76. <https://doi.org/10.5194/acp-17-47-2017>
- Switzerland (2022) Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2019, 657pp, Federal Office for the Environment (FOEN), Switzerland. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/che-2022-nir-14apr22.zip>
- United Kingdom (2022) UK Greenhouse Gas Inventory, 1990 to 2020, 1072pp, Department for Business Energy and Industrial Strategy, UK. [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/gbk-2022-nir-14apr22\\_0.zip](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/gbk-2022-nir-14apr22_0.zip)
- World Meteorological Organization (WMO) (2017) 19th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2017), GAW Report No. 242, 8pp. [https://library.wmo.int/index.php?lvl=author\\_see&id=12735](https://library.wmo.int/index.php?lvl=author_see&id=12735)
- World Meteorological Organization (WMO) (2018) An Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG<sup>3</sup>IS) Science Implementation Plan, GAW Report No 245, WMO, Switzerland. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10034](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10034)
- World Meteorological Organization (WMO) (2019) WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN - The State of Greenhouse Gases in the Atmospheric Based on Global Observations through 2018, No15. Dubendorf, Switzerland, 27-31 Aug. 2017, 150pp. [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=21620#YxVYRtPP2Uk](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21620#YxVYRtPP2Uk)
- Zhang, Q., Li, M., Wang, M., Mizzi, A.P., Huang, Y., Wei, C., Jin, J., Gu, Q. (2021) CO<sub>2</sub> Flux over the Contiguous United States in 2016 Inverted by WRF-Chem/DART from OCO-2 XCO<sub>2</sub> Retrievals. *Remote Sensing*, 13(15), 2996. <https://doi.org/10.3390/rs13152996>

## Authors Information

주상원 (국립기상과학원 기후연구부 기상연구관)

(swjoo@korea.kr)

이해영 (국립기상과학원 기후연구부 기상연구사)

(leehy80@korea.kr)

홍진규 (연세대학교 대기과학과 교수)

(jhong@yonsei.ac.kr)

권도윤 (연세대학교 대기과학과 대학원생 석사과정)

(doyoon\_kwon@yonsei.ac.kr)

심창섭 (한국환경연구원 선임연구위원)

(cshim@kei.re.kr)

오영석 (국립기상과학원 기후연구부 기상연구사)

(ysoh306@korea.kr)

이선란 (국립기상과학원 기후연구부 선임연구위원)

(sunranlee@korea.kr)

Samuel Takele Kenea (국립기상과학원 기후연구부 선임연구위원)

(samueltake@korea.kr)

이수정 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)

(soojeonglee@korea.kr)

김정은 (국립기상과학원 기후연구부 연구관)

(narci76@korea.kr)

부경운 (국립기상과학원 기후연구부 부장)

(kyungon@korea.kr)