



중국 대기오염물질 배출의 시공간적 변화 분석

Analysis of Regional and Inter-annual Changes of Air Pollutants Emissions in China

우정현 · 부찬종 · 김진수 · 김영성¹⁾ · 김윤하*

건국대학교 신기술융합학과, ¹⁾한국외국어대학교 환경학과

(2018년 1월 15일 접수, 2018년 2월 12일 수정, 2018년 2월 20일 채택)

Jung-Hun Woo, Chanjong Bu, Jinsu Kim, Young Sung Ghim¹⁾ and Younha Kim*

Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University

¹⁾*Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*

(Received 15 January 2018, revised 12 February 2018, accepted 20 February 2018)

Abstract

Fast economic growth and urbanization of China have been causing air pollution not only over its domestic but transboundary atmosphere. Recent high fine particle pollution episodes in China made the government move toward more stringent air pollution control policies - which are mostly fuel switching and emissions control. In this research, we tried to understand characteristics of Chinese emissions and their change by analyzing its emissions inventory by year, sector, and region. From the inter-comparison of existing bottom-up emission inventories, we found relatively good agreements (<20% difference) for SO₂ and NO_x, but 30% or more discrepancies for some pollutants. Inter-comparison with top-down NO_x emissions estimates also showed 20~50% differences by year. The regional distribution and inter-annual changes of emissions revealed different stages of energy/fuel mix and policy penetration. Early increase of pollutants emissions in the eastern part of China might give strong influences to the Korean peninsular in early 2000s but, more stringent control in that region would help improving air pollution in Korea in near future.

Key words : China air pollutants emissions, Bottom-up emissions inventory, Top-down emissions inventory, Regional emissions distribution

1. 서 론

아시아의 많은 국가들은 지리적인 조건에 의해 경제, 환경, 사회적으로 긴밀하게 연결되어 있다. 상호 이

해관계가 연결된 아시아에서 대기질 관리는 아시아인의 건강과 복지를 증진시키기 위해 아주 중요한 문제이며 공동의 노력을 통해서만 이룩할 수 있는 목표이기도 하다. 우리나라의 풍상방향에는 연료연소에 의한 배출량이 가장 많은 나라로 세계의 주목을 받고 있는 중국이 위치해 있으며 중국의 오염물질 배출은 우리나라로 장거리 이동하여 미세먼지 등 많은 문제를 일으

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-453-2706, E-mail : pinktokkya@naver.com

키고 있기 때문에 이를 잘 이해하는 것이 필요하다.

위와 같은 대기오염 문제에 대한 과학적인 분석과 관리를 위해 가장 기초가 되는 자료는 배출목록이라 할 수 있을 것이다. 배출목록 자료를 바탕으로 대기오염 배출원에서 발생하는 오염물질의 양과 대기로의 입력을 파악할 수 있다. 또한 이를 대기화학모델에 적용하여 대기화학조성을 예측한 다음, 예측된 자료를 기반으로 배출원들이 대기화학조성과 기후변화에 미치는 영향을 분석하고, 이러한 분석을 기반으로 대기오염을 줄이기 위한 대기오염 배출원 관리방안을 수립할 수 있다(NIER, 2011). 배출 자료는 정치적 측면이나, 경제적 측면에 있어 복잡한 상호 이해관계가 얽혀 있는 민감한 자료이면서, 또한 대기 환경 개선을 위한 정책적, 연구적 접근에서 요구되는 근간이 되는 중요한 정보이다. 즉, 대기관리 및 기후변화 대응 정책 수립의 필수적인 기초자료이며 정책의 성과를 평가하기 위한 주요한 도구이다(Choi, 2016; NIER, 2013).

하지만 배출목록의 작성에는 다양한 통계자료의 편차가 우선되어야 하고 그를 바탕으로 산정이 되기 때문에, 우리가 알 수 있는 최신의 배출정보란 일반적으로 현재보다 2~5년 전의 자료인 경우가 대부분이다. 에너지의 사용이나 대기환경정책이 이미 안정기에 들어선 선진국의 경우에는 이 정도의 편차가 그다지 크지 않다고도 볼 수 있지만, 경제 발전기와 급격한 정책 강화기에 있는 중국과 우리나라의 경우에는 이 정도 기간에도 많은 배출의 변화가 일어날 수 있다. 또한 중국의 성들은 지리적으로 넓은 지역에 걸쳐서 위치하고 있기 때문에 연료의 조성이나 정책의 적용이 지역적으로도 균등하게 적용되지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 중국 대기질 영향권 아래 있는 우리나라에 환경적인 영향을 미치는 중국의 배출 정보를 과학적으로 평가하고, 시공간적인 분석을 통하여 연료 사용과 저

감정책의 적용이 어떻게 최근의 대기오염물질 배출을 변화시켰는지 분석하는 것을 목적으로 설정하였다.

2. 연구 방법

배출량을 산정하기 위해서는 에너지 사용에 대한 연료 활동도 및 그 외 경제 및 사회 등 다양한 인간생활의 활동으로 인한 기타 활동도 자료와 각 단위 활동도당 배출하는 양을 나타내는 배출계수, 배출된 오염물질을 저감하는 저감기술의 사용 비율, 저감 효율 등이 적용된다. 그리고 이런 산정 인자들은 근본적으로 에너지나 정책, 인구, GDP 등 사회경제적인 요소들에 영향을 받는다. 대기오염물질의 배출에 영향을 미치는 인자와 그 기본적인 산정방법을 그림 1에 정리하였다. 이러한 배출량 산정방법에 따라 배출정도를 부문별, 연료별, 지역별 등으로 집대성하여 정리한 데이터베이스를 배출목록(인벤토리)이라 한다.

본 연구에서는 중국의 배출정보 분석을 통해 우리나라에 미치는 영향을 짐작해 보고자 하였다. 이를 위해, 1) 기존에 존재하고 있는 상향식 배출목록들을 조사하고 상호비교를 통해 서로 간 차이의 존재와 정도를 알아보았다. 이때 좀 더 종합적인 분석을 위해, 연도별로 확장할 수 있는 상향식 배출목록 중 하나를 선정하여 연도별, 부문별 변화 추이를 살펴보았다. 2) 선정된 인벤토리의 지역별, 시간별 변화를 분석하였으며, 이를 위해 중국의 성(Province)을 지역적 분석단위로 설정하고 5년 단위의 시간 변화에 따라 배출이 어떻게 지역별로 변화하는지 분석하여 보았다. 이때 연료 사용의 변동도 함께 분석하여 배출의 변화가 어떠한 요인에 기인하는지 파악하고자 하였다. 3) 이후 인공위성 관측에 기반한 하향식 배출목록을 이용하여 상향식 배출목록과의 차

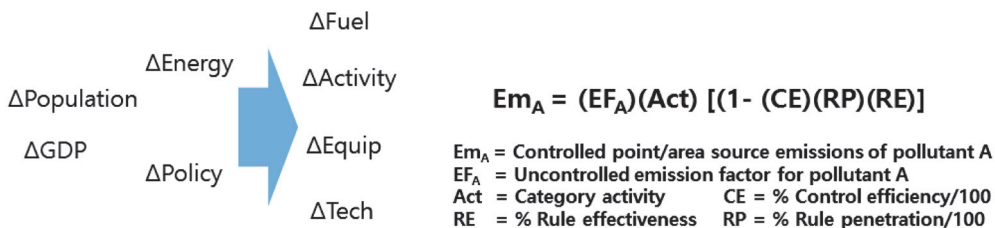


Fig. 1. Bottom-up emission calculation process.

이를 분석하였다. 그리고 이를 통해 상향식과 하향식의 차이가 많이 나는 지역을 추출하여 향후 그 원인이 무엇인지를 분석할 수 있는 기반을 제공하고자 하였다.

3. 상향식 인벤토리의 중국 배출량 분석

3.1 인벤토리별 국가 총량 비교

상향식 산정방법은 인벤토리 작성에 있어 세부 단위 별로 상세한 하위 자료를 수집하여 상위 단위의 배출량을 파악해 나가는 접근 방식이고, 하향식 산정방법은 상향식과는 반대로 관측농도자료와 대기화학수송 모형 등에서 도출된 추가 정보를 바탕으로 배출량을 도출한다. 중국의 배출정보를 이해하기 위한 가장 기본적인 방법은 국가 배출총량을 비교하는 것이다. 본 연구에서는 상향식 배출목록 중 중국 칭화대학(Tsinghua University)의 MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for china; Li *et al.*, 2017) 인벤토리, 국립환경과학원과 건국대학교가 개발한 CREATE (Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment) 2010년과 2015년 인벤토리, 그리고 CREATE를 기반으로 한-미 협력 국내 대기질 공동조사(KORUS-AQ)를 지원하기 위해 선형 외삽한 KORUS 2015 인벤토리, 유럽의 IIASA에서 개발한 GAINS (Greenhouse gases and Air pollutants INtegra-

tion and Synergies; gains.iiasa.ac.at/models/index.html) 프레임워크에 포함된 두 개의 인벤토리인 ECLIPSE (Evaluating the Climate and Air Quality Impacts of Short-Lived Pollutants; Klimont *et al.*, 2017)와 WEO 2016 (World Energy Outlook, 2016)에서의 중국 지역의 오염물질별 국가총량을 비교하여 보았다(그림 2).

그림 2에서 나타난 바와 같이 동일 국가인 중국의 배출총량은 대체적으로 10~30% 정도 범위에서 일치성을 보여주고 있으나, 연도와 물질에 따라서는 30% 이상의 차이를 보였다. 많은 상하향식 비교연구에서 활용되고 있는 NO_x의 경우 2010년 대상 인벤토리 중 ECLIPSE, CREATE (2010)에 비해 MEIC이 40% 정도 높은 배출량을 보였고, 2015년 대상 인벤토리의 경우 WEO, KORUS, CREATE가 모두 20% 이하의 차이만을 보였다. 이는 2010년에 대해 중국에서 산정된 배출량이 국제적인 인벤토리 틀에서 산정하고 있는 배출량에 비해 더 높은 NO_x의 배출량을 산정하고 있는 것이라 판단되며, 그 이유는 중국의 급격한 산업발전과 도시화를 얼마나 빠르게 반영하는가의 차이에서 기인한 것이라 추정된다.

이렇듯 대부분 국가별 오염물질 배출총량의 차이는 에너지 활동도 및 비에너지 활동도에 대한 가정과 사용하는 배출계수의 차이, 환경정책 실시 수준의 차이로 인한 저감 정도의 차이 등에 기인하고 있다고 판단된다. 그렇기 때문에 동일 연도, 동일 국가라고 하더라도

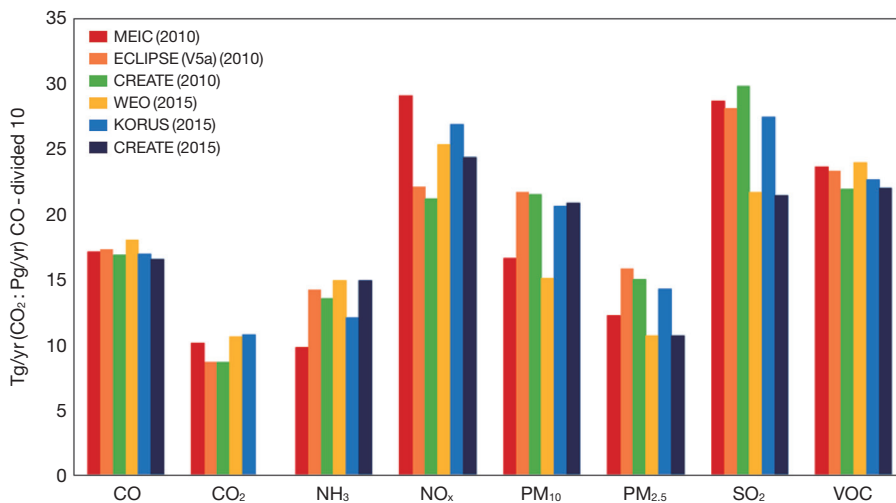


Fig. 2. Inter-comparison of bottom-up emission inventories for China.

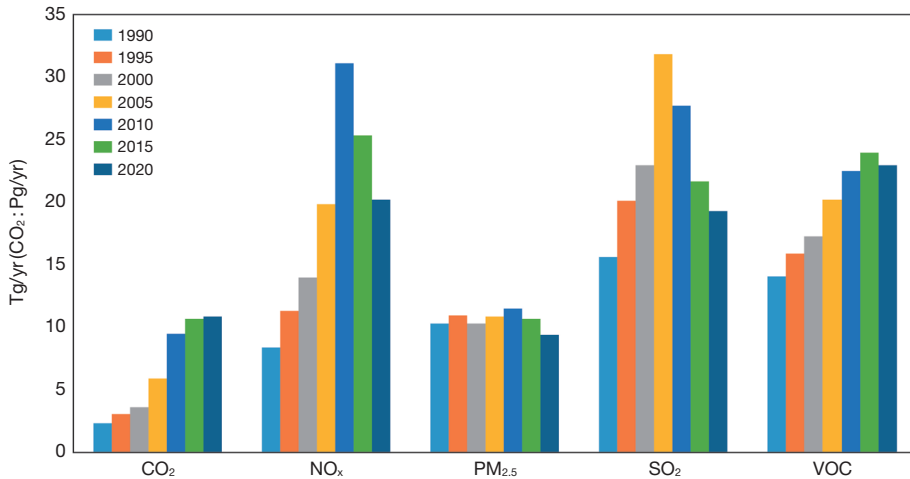


Fig. 3. Inter-annual emission trends by pollutant (China).

도 특정 연도의 물질별 총량만을 보고 비교하는 것에 한계가 있을 수 있다.

3.2 부문별 배출량의 연도별 변화

앞 절에서 사용한 분석의 한계를 보완하기 위하여 본 절에서는 GAINS 프레임워크의 가장 최신 시나리오인 WEO 2016 시나리오를 이용하여 WEO (2015) 인벤토리의 1990년부터 2020년까지의 5년 단위의 연도별 배출량 변화를 분석하여 보았다(그림 3). CO₂의 배출량은 1990년 이후로 계속적으로 증가하였지만, 나머지 물질 NO_x, PM_{2.5}, SO₂는 각각 2015년, 2010년, 2005년에 최대 배출량을 보이고 이후에는 점차 감소하는 경향이 나타났다. 기후변화 물질인 CO₂의 연도별 배출량 추이가 증가하는 것은 연료 사용량이 점진적으로 늘어났기 때문으로 판단되었다. 중국은 제11차·12차 국가 5개년 계획(2006~2015)부터 현재 제13차 5개년 계획까지 환경보호규칙에 있어 매우 강력한 환경보호 및 오염규제 정책을 펼치고 있다. 연료의 사용량이 증가하였음에도 불구하고 다른 대기오염물질들의 배출량이 특정 연도에 최대값을 보이고 이후 점차 감소하는 것은 2005년 이후 강화된 대기환경 개선정책으로 인하여 저감 기술이 더 많이 적용된 효과라고 추론된다.

이러한 추론을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여, 그림 4에 중국의 섹터별 배출량의 연도별 변화(1990~2020)를 나타내었다. CO₂의 배출량은 1990년 이후로

발전부문(Power Generation: POW), 산업부문(Industry: IND) 등에서 계속 증가하여, 총량적으로도 지속적인 증가 추세를 보였으나, SO₂ 배출량은 2005년까지 증가 후 발전부문에서의 감소영향으로 총량이 감소하는 추세를 보였다.

연료 사용에 선형적으로 반응하는 CO₂ 배출량이 늘어나는 추이를 통해서 배출량의 증가만큼 에너지의 사용량이 증가한 것으로 판단할 수 있다. 하지만 동일한 에너지 활동도를 쓰는 SO₂ 배출량이 2005년 이후 감소 추세로 돌아서는 것을 볼 때, 중국의 저감 정책적용으로 인한 배출량의 감소가, 특히 발전 부문을 중심으로 일어나는 것으로 판단할 수 있다. 실제로 제11차 5개년 계획에서는 아황산가스를 주요 오염물질로 정하고 배출총량을 2005년 대비 10% 감소를 목표로 하였다(NIER, 2016; MEP, 2013). NO_x의 경우 2010년을 중심으로 커다란 증가와 감소를 나타냈는데, 2005년부터 2010년으로의 증가를 보인 부분은 산업과 수송부문이고, 2010년 이후 감소를 이끈 것은 역시 발전부문의 영향이라고 판단되었다. 2000년 이후 VOC의 전체 배출량은 주거부문에서의 감소에도 불구하고 산업부문의 증가로 총 배출량은 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. PM_{2.5}의 경우 2010년을 기점으로 감소가 시작되었는데 발전, 산업, 주거부분에서 고른 감소를 보여 배출량을 줄이기 위한 정책이 모든 부문에 적용되어 온 것으로 판단된다.

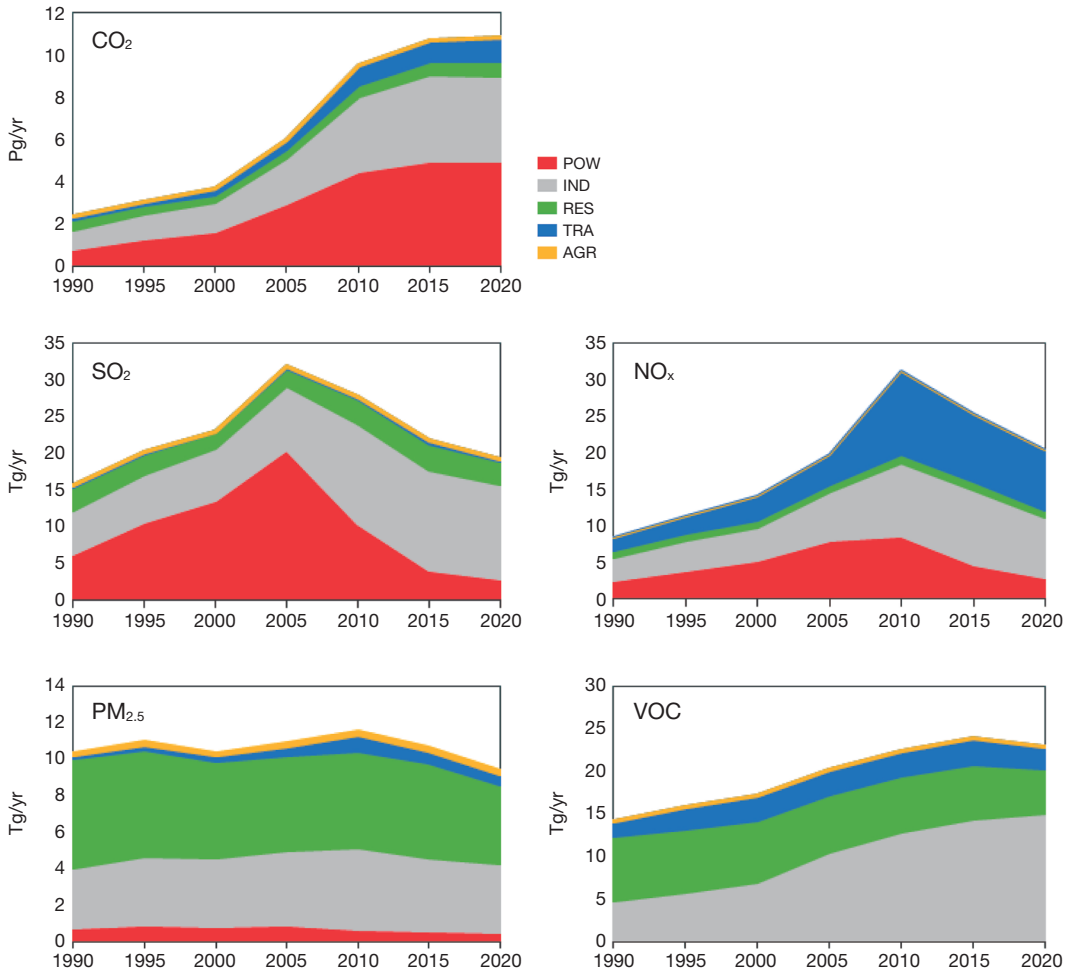


Fig. 4. Inter-annual emission trend by sector (China).

4. 주요 오염물질별 배출량의 시공간적 변화 분석

본 장에서는 중국의 지역별 오염물질 배출량의 시간적 분포를 비교함으로써, 배출량의 시공간적 변화를 파악하고자 하였다. 그리고 후처리 기술의 영향을 거의 받지 않는 CO₂로부터 서로 다른 후처리 정책/기술의 적용을 받는 SO₂, NO_x, PM_{2.5}, VOC까지 순차적으로 살펴봄으로써, 연료전환정책이나 후처리 기술 등의 적용이 서로 다른 오염물질 배출량의 시공간적 분포에 어떠한 영향을 미치는지를 유추해 보고자 하였다. 공간적 분석의 범위는 중국 전체이고, 분석 단위는 그림

5에서와 같이 성(Province) 단위이다.

4.1 CO₂

CO₂는 모든 섹터와 연료에서 배출되며, 탄소 포집 및 저장(CCS: Carbon Capture and Storage)을 제외하면 후처리 방법이 거의 존재하지 않는다. 그러므로 CO₂의 배출은 화석연료의 사용 활동도와 비슷한 분포를 보인다고 할 수 있다. 그림 6은 2000년부터 2015년까지의 CO₂의 지역별/연도별 배출량을 나타내어 놓은 것이다.

앞장에서 설명된 바와 같이 CO₂의 배출량은 1990년 이후로 지속적으로 증가하였는데, 특히 2000년에 들어



Fig. 5. Information of the provinces of China.

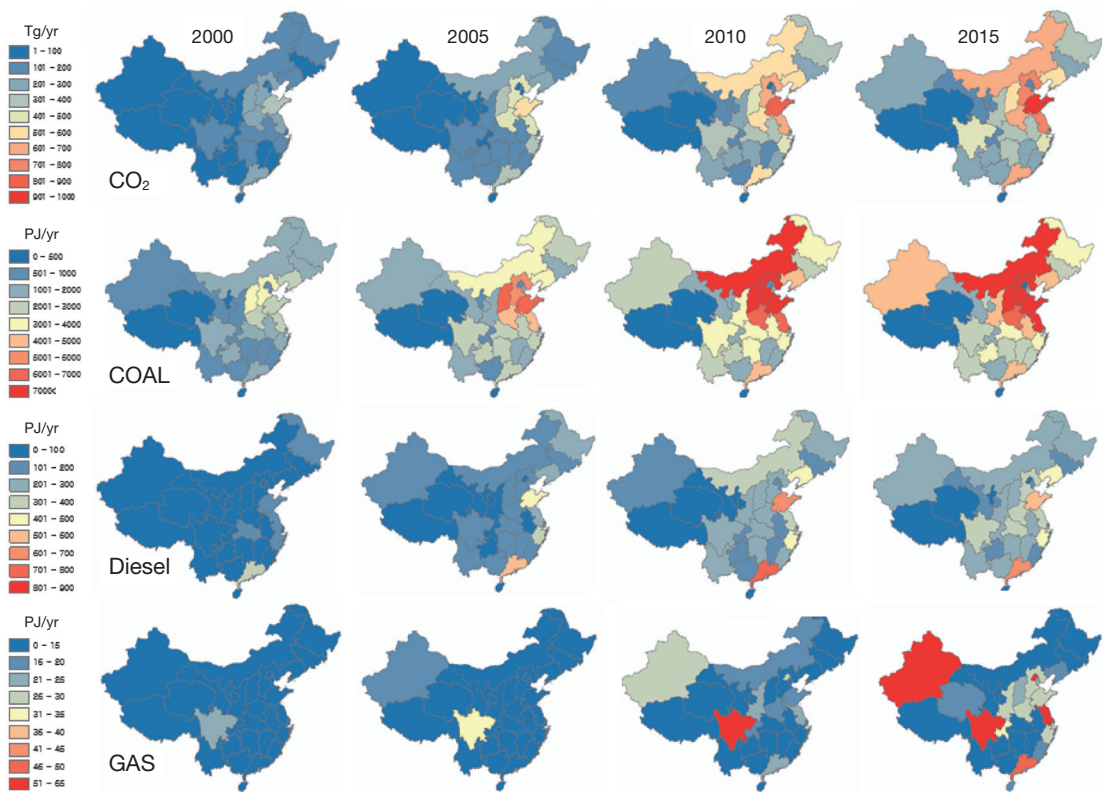


Fig. 6. CO₂ emissions and fuel consumptions by region/year.

서며 더욱 급격한 증가를 보였다. 부문별로는 발전부문(Power sector)의 기여가 가장 높았다. 그림 6을 보면 지역적으로는 특히 산둥성, 허베이성 등의 배출량 증가가 컸고, 주로 동부지역을 중심으로 배출량이 늘어나는 것을 볼 수 있다. 이는 동부지역에 산업화와 도시화가 진행되며 에너지 사용량이 급격히 증가하는 것을 보여 준다고 할 수 있다. 이를 뒷받침하기 위해 그림 6에 중국통계청(National Bureau of Statistics; <http://data.stats.gov.cn>)의 연료 사용량 자료를 함께 제시하였다. 석탄의 소비량은 CO₂의 배출량과 유사하게 산둥성, 허베이성 등에서 높게 나타나고, 또한 장수, 산시, 허난, 네이멍구 등에서도 높게 나타남을 알 수 있다. 차량에서 주로 소비되는 디젤유는 광둥, 산둥, 저장, 랴오닝성 등에서 높게 나타났고, 가스의 경우 베이징, 사천, 장수, 광둥 등에서 높게 나타났다. 전반적으로 연료 소비량의 시공간적 분포를 종합해 보면 CO₂ 배출량의 시공간적 변화와 유사함을 알 수 있다. 그러므로 연료 사용 활동도의 시공간적 변화는 산업화와 도시화가 급격히 이루어진 동부 지역들과 남부 해안 지역들 위주의 사용량 증가를 잘 대변해 주고 있다.

4.2 SO₂와 NO_x

SO₂는 연료 중에 포함된 황 성분이 연소하며 산소와 결합된 상태로 배출되는 것이기 때문에 연료의 황 함량이 매우 중요하다. 연료 중에 황의 함량이 높은 경우

는 주로 석탄과 증유로서 이들 연료의 사용량이 배출량에 직결된다고 볼 수 있다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 허베이, 산둥 등 동부지역의 이들 연료의 사용은 지난 15년간 지속적으로 증가하여 왔다. 하지만 그림 7에서 확인되는 바와 같이 SO₂의 배출량은 2005년까지는 산둥, 허베이, 장수, 저장 등 동부 지역의 연료 사용량이 급격히 증가하는 추세와 비슷한 성장세를 보이거나, 2010년과 2015년에는 줄어드는 지역들이 나타났다. 이들 지역은 허베이, 산시, 허난, 장수, 사천, 광둥성 등의 지역에 연료의 전환이나 배연탈황(FGD) 등의 설치가 이루어졌음을 추정할 수 있다.

NO_x는 연료 중에 포함된 질소 성분이 연소하며 산소와 결합하는 경우 이외에도 공기 중의 질소가 고온으로 산화된 상태로 배출되는 경우가 존재하기 때문에, 연료 종류에 따른 영향을 상대적으로 적게 받는다. 그러므로 NO_x의 배출은 주로 화석연료의 사용량과 저 NO_x 보일러, 배연탈질 장비의 설치, 자동차의 배출가스 기준강화 등의 관계에 따라 달라진다고 볼 수 있다. 그림 8과 같이 SO₂의 경우와 마찬가지로 NO_x 역시 도시화와 산업발달의 영향으로 동부지역에서 이들 연료의 사용은 지속적으로 증가하여 왔다. 이러한 추세에 따라 NO_x의 배출량은 대부분의 지역에서 2010년까지 지속적으로 증가하는 추세를 보였다. 이러한 증가 추세는 발전과 산업 등의 고정오염원 배출증가의 원인도 있지만, 도시화에 따른 자동차 대수 및 사용의 증가에

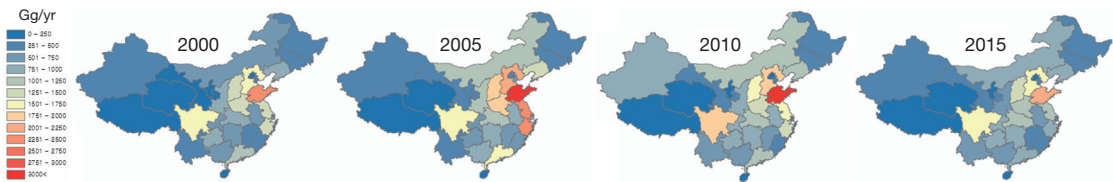


Fig. 7. SO₂ emissions by region/year.

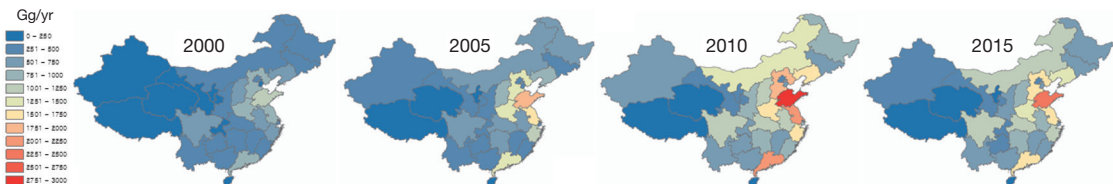


Fig. 8. NO_x emissions by region/year.

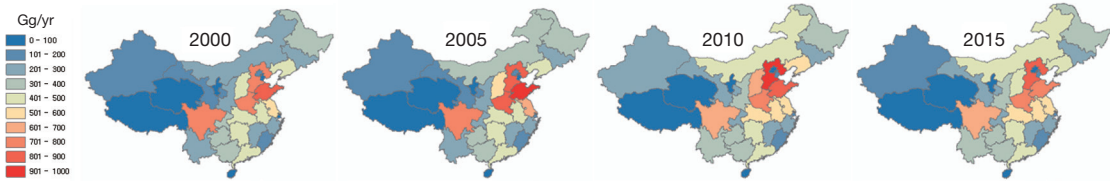


Fig. 9. PM_{2.5} emissions by region/year.

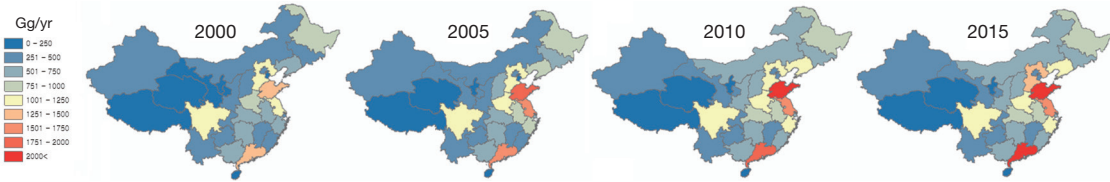


Fig. 10. VOC emissions by region/year.

기인한 바도 크다고 보인다(Liu *et al.*, 2016). 이후 2015년의 배출은 허난, 장수, 저장, 그리고 광둥성 등에서 2010년에 비해 줄어드는 것을 알 수 있고, 이는 배연탈질 설비와 이동오염원 배출허용기준 강화 등에서 기인한 것으로 추정된다.

4.3 PM_{2.5}와 VOC

연료 연소과정에서의 PM_{2.5}는 연료 중의 회분이나 불안전 연소 등으로 인해 발생된다. 그러므로 연소 중의 PM_{2.5}는 석탄 등의 고체연료에서 가장 많이 발생하고 중유나 디젤유 등에서도 발생한다. PM_{2.5}는 입자상 물질로서 기체상물질에 비해서 비교적 쉽게 처리할 수 있으며, 사이클론, 스프레이, 백필터나 전기집진기 등이 다양하게 쓰이고 있다. 그리고 흡수탑 같은 기체상물질의 저감장치가 PM_{2.5}에 대해서도 어느 정도의 저감 효율을 보일 수 있다.

그림 6에서 보이는 바와 같이 산업화 지역에서의 고체 연료의 사용은 지난 15년간 지속적으로 증가하여 왔다. 하지만 그림 9에서와 같이 PM_{2.5}의 배출량은 2010년까지는 연료 사용량의 증가 추세와 비슷한 성장세를 보이나, 2010년부터는 대부분의 지역에서 줄어드는 추세를 보였다. 전술한 바와 같이 이는 연료의 대체나 저감설비의 장착으로 PM_{2.5}의 배출이 줄어드는 것으로 판단된다.

VOC는 주로 연료의 연소보다는 휘발성유기물질의

사용과정에서 발생하고 배출된다. 특히 선진국의 경우, 유기용제의 사용, 산업공정, 이동오염원 등으로부터의 배출이 크게 나타난다. 하지만 개발도상국의 경우에는 이에 추가하여 낙후된 주거부문의 연소 장치로부터의 VOC 배출도 크게 나타나고 있다. 중국의 VOC 배출량은 산업발전과 도시화가 급속히 이루어진 허베이, 광둥, 산둥, 산시, 장수 등을 중심으로 크게 나타났는데, 이들 대부분의 지역은 2015년까지도 지속적인 증가세를 보여주고 있다(그림 10). 부문별로는 산업부문의 유기용제사용과 이동오염원의 증가가 전체적인 배출증가의 주요한 원인으로 나타나고 있다. VOC의 경우에는 입력관리를 하는 것 이외에 후처리 저감 방법의 실효성이 크지 않은 경우가 많아, 앞으로도 이 증가세는 어느 정도 유지될 것으로 보인다.

4.4 2000년부터의 시공간적 변동

전술한 물질별 연간 배출량 변동추세에서 많은 물질들의 배출량이 2005년 또는 2010년을 최대로 감소 경향을 나타내고 있었다. 그래서 본 절에서는 2000년부터 2015년까지의 지역별 변동을 평가해 보았다(그림 11).

우선 CO₂의 경우 2000년으로부터 2015년까지 꾸준히 증가하는 추세를 보였다. 하지만 증가율은 2005년에서 2010년 사이가 가장 높았고, 2010에서 2015년은 둔화되는 모습을 보였다. SO₂의 경우, 2000년에서 2005년 사이에는 대부분의 지역에서 증가하는 모습을

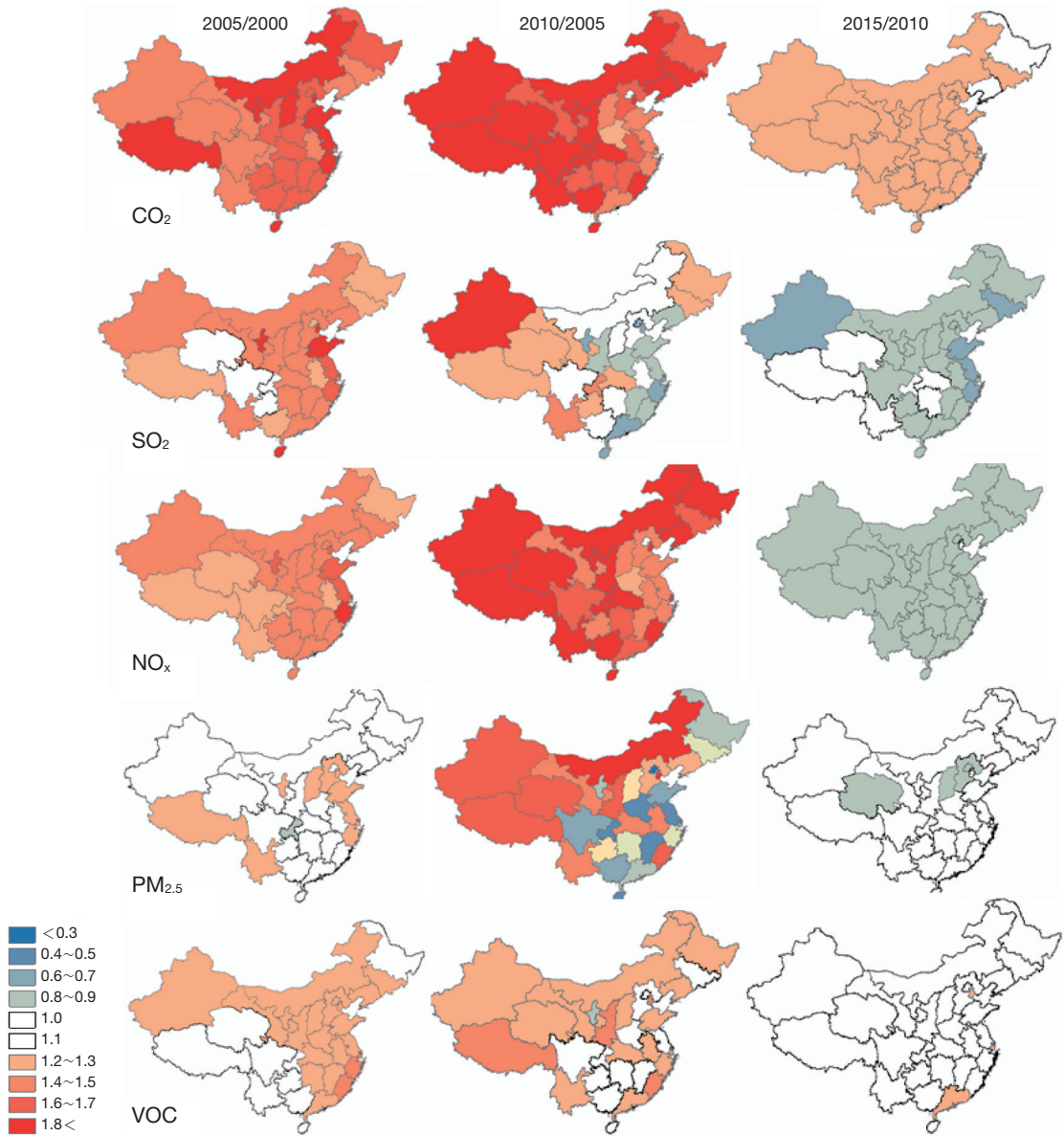


Fig. 11. 5-year emissions change rates by region (2000 ~ 2015).

보였고, 2005년에서 2010년 사이에서는 지역별로 증가와 감소 추이가 혼재되어 나타났다. 이 시기에는 이전의 기간에 많은 증가를 보였던 동부지역에서 주로 감소세를 나타내었고, 서부지역에서는 여전히 증가세를 보여주었다. 2010년으로부터 2015년은 전 지역에서 소강 또는 감소세를 나타내어 중국의 SO₂ 배출량이 전국적으로 감소함을 보여주었다. NO_x의 경우, 2000년에서

2010년 사이에는 대부분의 지역에서 증가하는 모습을 보였지만, 증가율은 2005년에서 2010년 사이가 가장 높았다. 하지만 2010년에서 2015년 사이에서는 대부분의 지역이 감소 추세를 나타냈다.

PM_{2.5}의 경우, 2000년에서 2005년 사이에는 대부분의 지역에서 소강상태를 보이고 일부지역에서만 증가하는 모습을 보였고, 2005년에서 2010년 사이에서는

지역별로 증가와 감소 추세를 나타냈다. 이 시기에는 북부와 서부에서 주로 증가세를 보여주었고, 중부와 동부에서는 주로 감소세를 나타내었다. 특히 도시화와 산업화가 집중적으로 진행된 베이징, 산둥, 허난, 장수, 사천, 광둥 등에서 많은 감소세를 보여주었다. 2010년에서 2015년 사이에는 전반적으로는 소강세를 나타내었으나 허베이, 산시, 상하이 등에서는 감소하였다. VOC는 2000년에서 2010년 사이에는 대부분의 지역에서 증가하는 모습을 보였다. 하지만 2010년에서 2015년 사이에서는 광둥을 제외한 대부분의 지역이 소강상태로 큰 증가 추세를 나타내지 않았다.

5. 상향식과 하향식 인벤토리 비교

5.1 상향식과 하향식 인벤토리의 연도별 배출량 변화 비교

앞 장에서의 분석을 통해 중국에 대한 상향식 배출 인벤토리 간 국가 배출 총량 비교와 연도별 변화분석을 통해 중국 배출량의 차이와 변화에 대한 이해를 높여 주었다. 본 장에서는 배출량의 차이와 변화에 대한 불확실성을 이해하기 위하여 상향식 인벤토리의 NO_x 배출량의 크기와 변이를 인공위성 관측 자료를 기반으로 한 하향식(Top-down) 인벤토리와 비교하였다. 하향식(Top-down) 인벤토리의 경우, 유럽의 GlobEmission 데이터베이스(<http://www.globemission.eu>)를 이용하였는데(그림 12), 본 연구에서는 OMI 센서 관측자료를 기반으로 한 NO_x의 일별, 격자별 배출량 자료(DECSCO:

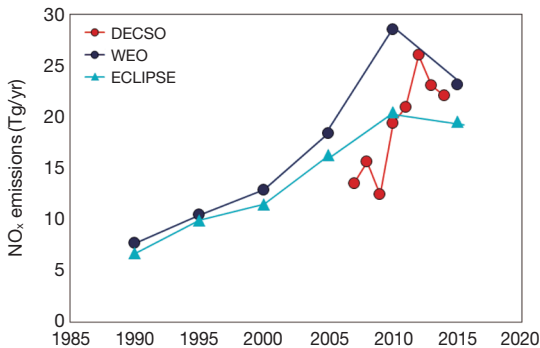


Fig. 12. Comparison of temporal changes in bottom-up and top-down (satellite) emissions (NO_x).

Daily Emission estimation Constrained by Satellite Observations)를 다운로드 하였다. 격자별 하향식 인벤토리 자료는 GIS 프로그램으로 처리하여 중국 도메인 내 성(Province)별 총량으로 환산하였고, 이를 GAINS-ECLIPSE/WEO 인벤토리와 2007년부터 2014년까지 비교하였다. DECSCO 자료는 일별 위성 궤점 관측자료를 활용하여 중규모(Mesosopic scale)의 단기체류 대기 오염물질의 배출량을 신속하게 업데이트할 수 있도록 특화된 알고리즘에 기반하여 작성되었다(Mijling and van der A, 2012)

OMI 센서 관측자료를 기반으로하는 DECSCO 자료의 도메인이 중국 전체 지역을 포함하고 있지 않아서 비교하는 GAINS-ECLIPSE/WEO 인벤토리의 도메인을 DECSCO와 일치시켜 재계산 후 상호비교분석을 하였다.

그림 12에서 보이는 바와 같이, 5년 단위로 생산되는 ECLIPSE와 WEO의 경우 2010년을 최대로 배출량이 증가하다 추이가 바뀌며 감소하는 경향을 보이지만 그 최대값은 상당한 편차를 보인다. 이는 2010년 부근에 나타난 도시화와 산업 발전의 증가에 대한 반영이 최신 인벤토리인 WEO에서 더 크게 나타나서라고 판단된다. WEO의 값이 중국연구자들의 인벤토리인 MEIC의 값과 상당히 유사하게 나타나는 것이 이러한 판단을 뒷받침 해준다고 볼 수 있다. 상향식 인벤토리인 DECSCO에서도 2012년에서 최대값을 나타내고 다시 감소하여 추이는 비슷한 경향이 나타났지만, 그 크기는 상향식 인벤토리들과 10~50% 정도의 배출량 차이를 보였다. 2010년의 경우에는 DECSCO와 ECLIPSE가 상당히 근접한 반면 2012년에는 WEO와 근접함을 보인다.

그림 13은 중국인벤토리에 대한 상향식 배출량산정

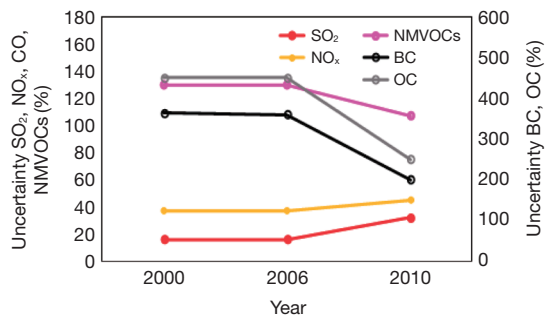


Fig. 13. Overall uncertainty in emission estimates for china (±95% confidence intervals, Unit: %).

의 불확실성에 대해 3개의 논문(Kurokawa *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2009; Streets *et al.*, 2006)을 재정리한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 중국의 상향식 NO_x 배출량에 대한 불확실성은 Error Propagation 방법을 써서 산정하였을 때 15~50% 정도의 불확실성을 보였다. 그렇기 때문에 본 연구에서 비교한 상-하향식 인벤토리의 비교에서 나타난 편차는 상향식 배출량 산정의 편차와 유사한 수준이라고 판단된다. 단지 5년 단위의 산정을 하는 GAINS-ECLIPSE/WEO 인벤토리는 매일의 실제 위성관측에 기반한 DECISO 인벤토리에 비해 중국 배출량의 변화를 빠르게 반영하지는 못하는 것으로 보인다.

5.2 상향식과 하향식 인벤토리의 지역별 배출량 분포 비교

상향식 또는 상-하향식 배출량의 크기 차이를 배제하고 지역에 따른 배출량 분포만을 고려하기 위해서, GlobEmission-DECISO의 국가총량 대 지역별 배출비율을 WEO에 적용해 WEO(TD)라고 명명하였다. 그리고 결과를 원래의 WEO 인벤토리의 2015년 지역적 분포와 비교하였다(그림 14). 그림에서 1보다 큰 값은 하향식이 상향식에 비해 높은 값을 보였음을 의미한다. 전반적으로 성별 배출량의 분포는 30% 편차 이내에서 유사하게 나타났지만, 상대적으로 큰 편차를 보이는

지역도 나타났다.

지역별 배출량의 비교에서 WEO(TD)가 WEO에 비해 높게 나타나는 지역은 베이징, 귀조우, 헤난, 산시, 허베이, 장수, 저장, 안후이, 산둥 등으로 나타났고, 반대의 경우는 지린, 하이난, 랴오닝, 장시, 후베이, 상하이, 닝샤, 후난, 티안진, 충칭, 산시 등에서 나타났다. 두 자료 간의 편차는 존재하지만 이러한 편차는 두 가지 방법의 차이를 고려하면 비정상적인 수준은 아닌 것으로 판단된다. 배출량 산정 방법의 특성상 관측 당시의 측정값에 기반하는 하향식 배출인벤토리는 상향식에 비해 그 시점의 지역적 분포를 잘 대변할 가능성이 높고, 그러한 지역적 분포의 편차는 에너지 공급의 급격한 변화보다는 주로 빠르고 강력한 환경 정책에 의한 저감을 신속하게 반영하지 못함에서 오는 경우가 많다고 판단된다.

그림 15에 (a) 상-하향식의 NO_x 배출량 차이가 20% 이상인 지역들과 (b) 중국의 대기오염규제 특별 관리 지역들에 대한 정보를 나타내어 놓았다. (a)의 청색은 하향식 인벤토리가 상향식 인벤토리보다 더 높은 배출량을 나타내는 지역이며, 상향식 인벤토리가 하향식에 비해 더 높은 배출을 나타내는 지역을 적색으로 표기하였다. (b)를 보면 적색으로 표기된 지역은 가장 중점적으로 대기환경개선을 위한 특별 관리를 실시하는 지역으로 BTH(Beijing-Tianjin-Hebei)는 북경 주변 지

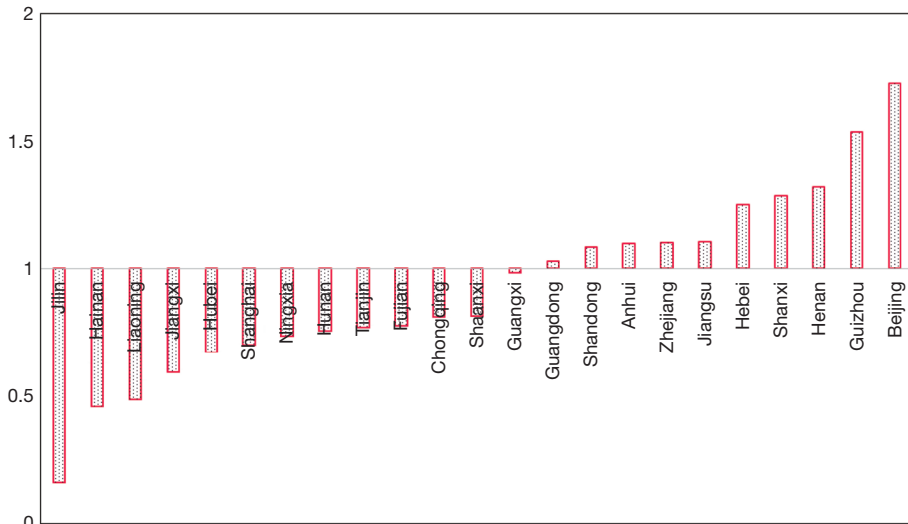


Fig. 14. Ratio of WEO (TD) to WEO NO_x emission estimates.

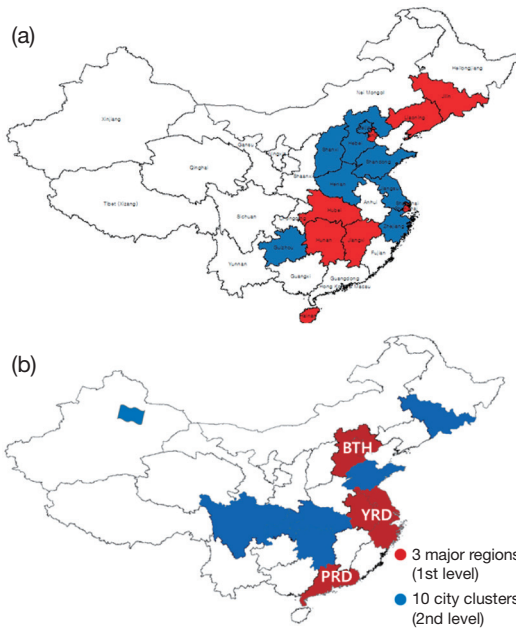


Fig. 15. Regions of china: (a) regions of WEO (TD)/WEO difference (Blue: WEO (TD) > WEO, Red: WEO (TD) < WEO); (b) Regions of 1st level (red) and 2nd level (blue) air quality improvement plan.

역, YRD (Yangtze River Delta)는 장강삼각주 상해일대 지역, PRD (Pearl River Delta)는 주강삼각주 광둥일대 지역을 의미한다. 청색으로 표기된 곳은 10개의 대기환경중점관리 도시 클러스터로 3대 대기오염 특별 관리 지역 다음으로 중점적으로 관리·규제를 실시하는 지역이다(MEP, 2013). 그림 15에 나타난 (a)의 지역들과 (b)의 지역들 간에는 상당한 유사성이 나타났다. 이는 상·하향식 인벤토리의 지역적 분포상의 편차가 주로 정책의 적용과 관련되어 있음을 나타내고 있는 것이라 볼 수 있으며, 앞으로 이 부분에 대한 구조적 연구가 필요함을 시사해 주고 있다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 대기환경에 지대한 영향을 미치는 중국의 배출 정보에 대해 시공간적인 분석을 수행하고 현재의 문제점과 개선 방향을 알아보았다. 이를 위해, 1) 기존에 존재하고 있는 상향식 배출목

록들을 조사하고 상호비교를 통해 서로 간 차이의 존재와 정도를 알아보았다. 이때 좀 더 종합적인 분석을 위해 상향식 배출목록 중 하나를 선정하여 연도별, 섹터별 분석을 수행하였다. 2) 또한 중국의 성별 배출량이 연도별로 어떻게 변화하는지를 물질별로 살펴보고, 활동도의 시공간 변화와 연계시켜 해석해 봄으로써 지난 15년간의 중국배출의 변화를 파악하고자 하였다. 3) 이후 상향식 배출목록의 문제점을 극복하기 위해 인공위성과 모델링 기법을 활용한 하향식 배출목록을 이용하여 상향식 배출목록과의 차이와 원인을 분석하였다.

인벤토리 간의 총량 비교에서는 대체적으로 10~30% 정도 범위에서 일치성을 보여주고 있으나, 연도와 물질에 따라서는 30% 이상의 차이를 보였다. 이는 대부분 기준연도 차이에 따른 에너지 활동도의 변화, 비에너지 활동도에 대한 가정, 사용하는 배출계수의 차이, 환경정책의 실시 수준 차이로 인한 저감 정도의 차이 등에서 기인하고 있다고 판단된다. 총량의 시간적 변화 비교에서는 CO₂의 배출량은 1990년 이후로 계속적으로 증가하였지만, NO_x, PM_{2.5}, SO₂는 각각 2010년, 2010년, 2005년에 최대 배출량을 보이고 이후에는 점차 감소하는 경향이 나타났다. 기후변화 물질 CO₂의 연도별 배출량의 추이가 증가하는 것은 연료 사용량이 점진적으로 늘어났기 때문으로 판단하였고, 다른 물질들은 정책 또는 기술의 적용으로 인해 점차 감소하는 추이를 보이는 것으로 판단된다. 섹터별 배출량의 연도별 변화(1990~2020)를 물질별로 살펴보면 CO₂의 배출량은 1990년 이후로 발전 및 산업부문 등에서 계속 증가하여, 총량적으로도 지속적인 증가 추세를 보였으나, SO₂ 배출량은 발전부문에서의 감소영향으로 총량이 감소하는 추세를 보였다. NO_x의 경우 증가를 보인 부분은 산업과 수송부문이고, 2010년 이후 감소를 이끈 것은 역시 발전부문의 영향이라고 판단되었다. 2000년 이후 VOC의 전체 배출량은 주거부문에서의 감소에도 불구하고 산업부문의 증가로 총 배출량은 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있었고, PM_{2.5}의 경우 발전, 산업, 주거부문에서 고른 감소를 보여 배출량을 줄이기 위한 정책이 모든 부문에 적용되어 온 것으로 판단된다.

또한 중국의 지역별 오염물질 배출량의 연간변화를 비교함으로써, 배출량의 시공간적 변화를 파악하고자 하였다. 이를 위해 후처리 기술의 영향을 거의 받지 않

는 CO₂로부터, 서로 다른 후처리 정책/기술의 적용을 받는 SO₂, NO_x, PM_{2.5}, VOC까지를 순차적으로 살펴봄으로써, 연료전환정책이나 후처리 기술 등의 적용이 서로 다른 오염물질 배출량의 시공간적 분포에 어떠한 영향을 미치는지를 유추해 보고자 하였다. CO₂의 경우 2000년으로부터 2015년까지 전 지역에서 꾸준히 증가하는 추세를 보였으나, 증가율은 2005년에서 2010년 사이가 가장 높았고, 2010에서 2015년은 둔화되는 모습을 보였다. SO₂의 경우, 2000년에서 2005년 사이에는 대부분의 지역에서 증가하는 모습을 보였고, 2005년에서 2010년 사이에서는 지역별로 증가와 감소 추세를 나타냈는데, 이전의 기간에 많은 증가를 보였던 동부지역에서 주로 감소세를 나타내었고, 서부지역에서는 여전히 증가세를 보여주었다. 2010년으로부터 2015년은 전 지역에서 소강 또는 감소세를 나타내어 이 기간 동안 중국의 SO₂ 배출량이 전국적으로 감소함을 보여주었다. NO_x의 경우, 2000년에서 2010년 사이에는 대부분의 지역에서 증가하는 모습을 보였지만, 증가율은 2005년에서 2010년 사이가 가장 높았다. 하지만 2010년에서 2015년 사이에서는 대부분의 지역이 감소 추세를 나타냈다. PM_{2.5}의 경우, 2000년에서 2005년 사이에는 대부분의 지역에서 소강상태를 보이고 일부 지역에서만 증가하는 모습을 보였고, 2005년에서 2010년 사이에서는 지역별로 증가와 감소 추세를 나타냈다. 2005년에서 2010년 사이에는 북부와 서부에서 주로 증가세를 보여주었고, 중부와 동부에서는 주로 감소세를 나타내었는데, 특히 도시화와 산업화가 이루어진 베이징, 산둥, 허난, 장수, 사천, 광둥 등에서 많은 감소세를 보여주었다. VOC는 2000년에서 2010년 사이에는 대부분의 지역에서 증가하는 모습을 보였으나 2010년에서 2015년 사이에서는 광동을 제외한 대부분의 지역이 소강상태로 큰 증가 추세를 나타내지 않았다.

현재의 배출량과 기준연도 배출량의 편차, 그리고 에너지통계에 기반한 상향식(Bottom-up) 산정방법론과 직접관측에 기반한 하향식(Top-down) 산정방법론과의 비교 검증을 위해, 본 연구에서는 GlobEmission 웹 데이터베이스의 DECSO 자료를 이용하여 하향식 NO_x 중국 총량 인벤토리를 작성하여, GAINS-ECLIPSE/WEO자료와 연간변화를 비교하였다. 그 결과 NO_x 배출량의 총량은 상향식과 하향식 배출량이 확실성의

범위(15~50% 정도) 내에서 비교적 서로 잘 맞는다고 볼 수 있었다. 지역별로는 WEO(TD)가 WEO에 비해 높게 나타나는 지역은 베이징, 귀주오, 허난, 산시, 허베이, 장수, 저장, 안후이, 산둥 등으로 나타났고, 반대의 경우는 진린, 하이난, 랴오닝, 장시, 후베이, 상하이, 닝샤, 후난, 티안진, 충칭, 산시 등에서 나타나 환경정책의 적용 정도에 대한 분석이 필요한 것으로 판단되었다. 그림 15에서와 같이 이들 지역을 중국의 1차(적색)와 2차(청색) 특별 대책 지역들과 비교한 결과 상당한 유사성이 나타나, 상-하향식 인벤토리의 지역적 분포상의 편차가 주로 정책의 적용과 관련되어 있음을 반증해 주는 것으로 판단하였고 추후 정책과 배출분포 간의 좀 더 심층적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

위의 결과들로 유추해 볼 때 VOC를 제외한 나머지 물질들은 2010년 이후 배출량이 감소 추세로 돌아선 것으로 보이며, 주로 우리나라와 지리적으로 근접한 동부지역 쪽에서 더 급속한 감소를 보이고 있다. 그 원인으로서는 연료소비량의 증가추세 둔화와 강력한 환경정책의 시행 등으로 판단되며, 이는 향후에도 우리나라로의 오염물질 이동이 줄어들 전망임을 나타내는 것이라 판단된다. 현재 중국은 대기 정책 13th 5개년계획, 오염방지행동계획 등 국가 차원에서 다양한 노력들을 강구하고 있고 이에 따라 다양한 계획을 내놓고 있는 실정이다. 이런 계획들을 인벤토리에 좀 더 신속하게 적용한다면 중국의 지역별 배출의 최신 현황을 파악하는데 도움이 되고 나아가 우리나라로의 대기오염 이동을 좀 더 정확히 이해할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 국립환경과학원의 “권역별 배출원-기상-지형을 고려한 대기질 특성 심층 분석 연구”와 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 “한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트사업”의 지원을 받아 수행함(NRF-2017M3D8A1092022).

References

Choi, K.-C. (2016) Improvement of bottom-up emissions

- inventory of anthropogenic carbon monoxide for Northeast Asia, Konkuk University. 2016.08. (in Korean with English abstract)
- IIASA: GAINS-Online (2017) available at: <http://gains.iiasa.ac.at/models/index.html>, last access: 4 October 2017.
- Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., Borken-Kleefeld, J., Schöpp, W. (2017) Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 8681-8723, <https://doi.org/10.5194/acp-17-8681-2017>, 2017.
- Kurokawa, J., Ohara, T., Morikawa, T., Hanayama, S., Janssens-Maenhout, G., Fukui, T., Kawashima, K., Aki-moto, H. (2013) Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 11019-58. <https://doi.org/10.5194/acp-13-11019-2013>.
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J.-I., Woo, J.-H., He, K., Lu, Z., Ohara, T., Song, Y., Streets, D.G., Carmichael, G.R., Cheng, Y., Hong, C., Huo, H., Jiang, X., Kang, S., Liu, F., Su, H., Zheng, B. (2017) MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 935-963, doi:10.5194/acp-17-935-2017, 2017.
- Liu, F., Zhang, Q., van der A, R.J., Zheng, B., Tong, D., Yan, L., He, K.B. (2016), Recent reduction in NO_x emissions over China from satellite observations and emission inventories, *Environmental Research Letters*, 11, 114002.
- Mijling, B., van der A, R.J. (2012) Using daily satellite obser-vations to estimate emissions of short-lived air pol-lutants on a mesoscopic scale, *Journal of Geophysical Research*, vol 117, D17302, doi:10.1029/2012JD017817.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2013) the State Council issues Action Plan on Prevention and Control of Air Pollution introducing ten measures to improve air quality, 2013.09.12.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2011) Development of the Asia Emission Inventory in Support of Integrated Modeling of Climate and Air Quality (I), 2011. 11.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Development of the Asia Emission Inventory in Support of Integrated Modeling of Climate and Air Quality (III), 2013. 11.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Analysis on Economic Effects Based on Future Scenarios with Consideration of Reduction-Adap-tation Strategy over East Asia. 2016. 06.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) Preliminary Report on KORUS-AQ.
- Streets, D.G., Zhang, Q., Wang, L., He, K., Hao, J., Wu, Y., Tang, Y., Carmichael, G.R. (2006) Revisiting China's CO emissions after TRACE-P: Synthesis of inven-tories, atmospheric modeling, and observations, *Journal of Geophysical Research*, vol 111, D14306, doi:10.1029/2006JD007118.
- Zhang, Q., Streets, D.G., Carmichael, G.R., He, K.B., Huo, H., Kannari, A., Klimont, Z., Park, I.S., Reddy, S., Fu, J.S., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L.T., Yao, Z.L. (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5131-5153.