

# 배출원-수용지 관계와 위성 관측자료를 이용한 배출량 개선 방법에 대한 연구

## Study of the Emission Correcting Methods Using Source-receptor Relationship and Satellite Observing Data

최원준\*, 정부진\*\*

국립환경과학원 환경위성센터\*, 건국대학교 신기술융합학과\*\*

Won Jun Choi(choiwj@me.go.kr)\*, Bujeon Jung(bujeon.jung@gmail.com)\*\*

### 요약

원격탐사 기술 발달로 대기 중 미량기체 농도 측정이 가능하게 됨에 따라 환경부는 1,525억여원을 투입하여 정지궤도 환경위성과 운영 기반을 구축하고 있다. 또한, 막대한 비용이 투입되는 환경위성의 편익을 높이기 위해 활용을 위한 다양한 콘텐츠를 개발하고 있다. 본 연구는 위성 활용을 위한 배출량 정확도 개선 연구로, 현재 상향식 방식으로 산정되고 있는 배출량을 위성에서 관측된 자료를 이용하여 하향식 방식으로 정확도를 개선하는 연구를 수행하였다. NO<sub>2</sub> 배출량 개선을 위해 두 가지 방법론을 분석하였으며, 하나는 NO<sub>2</sub>의 이동을 고려하지 않은 방법(method-1), 다른 하나는 NO<sub>2</sub>의 이동 영향을 반영하기 위해 배출원-수용지 관계식을 도입(method-2)한 방법으로 상호 결과를 비교하였다. 해당 방법론은 본 연구에서 대상물질인 NO<sub>2</sub> 뿐만 아니라 위성에서 관측되는 대기오염물질 전부에 적용 가능할 것으로 판단된다.

■ 중심어 : | 대기환경 | 배출량 개선 | 위성자료 | 배출원-수용지 관계 |

### Abstract

With the development of remote sensing technology, it becomes possible to measure the trace gas concentration by satellites, so the ministry of environment is executing 152.5 billion-won to develop the geostationary orbital environment monitoring satellite and ground segment. A variety of contents for the application to utilize environmental satellite has been sought to increase the benefits. This study is for the improvement the accuracy of emission inventories, to correct emission amount with top-down method using the satellite observing data instead of bottom-up method. Two methodologies to estimate NO<sub>2</sub> emission were analyzed, one is ignoring NO<sub>2</sub> transportation effect(method-1), and the other is considering transportation effect(method-2) with source-receptor relationship equation, and the results were compared. The methodology of this study can be applicable all components which are observed from satellites.

■ keyword : | Atmospheric Environment | Emission Improvement | Satellite Observation Data | Source-receptor Relationship |

\* 본 연구는 환경부 국립환경과학원 연구과제(환경위성을 활용한 기후변화 및 대기환경 감시, 1900-1946-345-210-13)로 수행되었습니다.

접수일자 : 2019년 02월 07일

수정일자 : 2019년 03월 05일

심사완료일 : 2019년 03월 06일

교신저자 : 최원준, e-mail : choiwj@me.go.kr

## I. 서론

효과적인 대기환경 정책 수립 및 이행을 위해서는 대기오염물질의 정확한 관측과 평가가 필요하며, 이를 위해서는 해당 국가뿐만 아니라 주변국가의 오염물질 배출 및 이동 특성 분석과 그로 인한 국내 대기질 영향 파악이 필수적이다. 이러한 이유로 여러 국가에서는 관측망 구축 등을 통해 체계적이고 지속적인 모니터링에 많은 노력을 기울이고 있으나, 오염물질의 배출이 외교문제와 직결되는 만큼 자료 유출은 극도로 경계하는 추세이다.

특히, 좁은 영토와 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라는 지상 관측과 항공 관측과 같은 직접적인 관측으로 주변국가의 영향을 파악하기에는 시·공간적인 한계가 있으며, 이러한 직접적 관측의 단점을 보완하기 위해서는 추가적인 방법이 필요하다. 일반적으로 모델링을 통한 방법이 활용되고 있으나, 자료 검증 부족 등 직접 관측을 대체하기에는 부족하다고 평가된다. 최근에는 대기권 밖에서 위성을 통한 대기 중 미량기체의 농도를 원격으로 측정이 가능하게 됨에 따라, 광범위한 영역을 빠르게 관측하여 관측 영역의 한계를 극복하고, 모델링과 상호 연계를 통해 해상 및 주변국들의 오염배출에 대한 정량적 자료 확보가 가능하게 될 것으로 기대하고 있다. 이러한 위성을 이용한 대기질 관측 효과와 필요성이 인정되어 환경부는 '20년 발사 목표인 정지궤도 복합위성 2B에 환경센서 탑재를 추진하고 있다[1]. 또한, 환경위성의 자료 수신 및 처리, 배포, 활용을 위해 환경위성센터를 설치하고, 환경위성 개발과 지상국 기반 시설을 구축, 막대한 예산이 투입되는 환경위성 개발의 편익 확대를 위한 활용 콘텐츠 개발을 지속적으로 수행하고 있으며, 본 연구는 환경위성 활용 연구 중 배출량 개선 연구를 수행하고 그 결과를 분석하였다.

## II. 연구내용 및 방법

대기오염물질의 장거리 이동 현상에 따라, 한반도로 이동되는 대기오염물질의 배출·이동 관측을 위해 환경위성 관측 자료를 이용하여 대기화학모델 입력 배출

량 개선 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 OMI 위성의 NO<sub>2</sub> 농도 자료와 국가대기배출량 자료(CAPSS)를 이용하여 수도권 지역의 하향식 배출량 시범 산정 연구를 수행하고 그 결과를 제시하였다.

### 1. 위성 관측 자료

사용된 위성 자료는 2004년 7월 발사된 EOS-Aura 위성에 탑재된 OMI 관측 자료를 사용하였다.

OMI는 270~500 nm의 자외선 및 가시광선 영역을 직하점 (nadir) 방식으로 관측한다[2]. 자외선 채널은 두 개의 하위 채널 (UV-1, UV-2)로 구성되어 있으며, 파장영역은 각각 270~310 nm와 310~365 nm, 평균 스펙트럼 분해능은 각각 0.42 nm와 0.45 nm로 매우 조밀한 분광 분해능을 가지고 있다. 가시광 채널 영역은 365~500 nm이며, 평균 스펙트럼 분해능은 0.63 nm이다. 또한 OMI의 관측 각(field of view)은 114°로 지상 관측 범위(swath)가 2,600 km에 달해 하루 만에 전구를 관측할 수 있다. 지구 공전 시 적도 지역을 13:45분(LST) 경에 통과하는 태양동기궤도이며, 공간해상도는 13×24 km<sup>2</sup>, 관측대상은 미량기체인 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, OCIO, BrO 등이 있다.

본 연구에서 사용한 자료는 NASA에서 제공 하는 2005년 일 대기권 NO<sub>2</sub> 전량 자료의 Level-2 자료를 이용하였다[3]. 또한, 구름에 의한 영향을 제거하기 위하여 구름운량(effective cloud fraction)이 0.2 이하인 자료만을 사용하여 위·경도 54×54km<sup>2</sup> 격자의 일별 자료를 생성하여 사용하였다[4-7].

### 2. 모델링 방법

국립환경과학원에서는 기후변화에 따른 지역규모 대기환경 예측을 위한 통합시스템을 구축·운영하고 있으며, 이 통합시스템은 전구 기후모델(CCSM4) 및 화학모델(GeosChem)을 통해 전구의 기후 및 대기환경을 예측하고 중규모의 기후 영향 모의를 위해 지역규모의 기상모델(MM5)과 화학모델(CMAQ)을 이용하여 한반도의 대기환경을 예측한다[8][9]. 지역규모 대기화학 모델로 사용된 CMAQ은 3세대 대기질 모델로서 대기 화학 및 물리의 복잡한 과정을 이해하기 위해 만들어진 모델

로 기체상 및 입자상 오염물질 농도를 모사할 수 있으며, 여러 가지 오염물질을 동시에 고려할 수 있어 황 화합물이나 오존 화합물뿐만 아니라 기후적 측면과 국지 오염 측면 등에서 중요한 에어러졸도 동시에 고려할 수 있다. 또한 대기 중에서 발생하는 광화학 반응과 관련된 화학반응 모듈을 사용함으로써 오존과 같은 광화학 오염물질의 모사에 적합한 대표적인 3차원 광화학 격자모델이다[10].

본 연구에서 사용한 모델링 영역은 105(동서)×65(남북)×23(연직)개 격자로 구성되어 있으며 수평격자의 크기는 54km이며, 사용된 화학반응 메커니즘으로 기체상과 입자상 반응을 모두 고려하였다. 기체상 반응으로는 CB4 메커니즘, 입자상 반응으로는 Models-3/CMAQ의 Aero3 모듈을 이용하였다. 대상사례는 [표 1]과 같이 2개 사례를 선정하여 연구를 수행하였으며, NO<sub>2</sub> 자료는 ppbv 값과 배출량 산정을 위하여 수직 컬럼 농도 (molecular number/cm<sup>2</sup>)로 환산하여 사용하였다.

표 1. 하향식 배출량 시범 산정을 위한 사례 기간

| 사 례 명   | Case 1      | Case 2         |
|---------|-------------|----------------|
| 기 간     | '05.2.2 - 6 | '05.10.16 - 20 |
| 상관계수(R) | 0.94        | 0.47           |

### III. 연구결과 및 고찰

#### 1. 사례 분석

배출량 시범 산정을 위한 사례 선정 방법은 수도권 지역에서 위성관측이 3일 연속 관측된 기간에 대하여 위성 관측의 대기권 NO<sub>2</sub> 총량 농도와 지상관측 NO<sub>2</sub> 농도의 상관계수를 구하여 연구 기간을 설정하였다. 이러한 상관관계는 계절별 특성 등 미량기체의 이동에 영향을 주는 기상 인자 특성을 대표할 수 있는 인자로 판단되며, 상관성이 높은 Case 1은 주변 지역의 배출에 따른 상층 대기의 영향이 적게 나타나고, 작은 Case 2는 주변 지역 배출에 영향을 받을 것으로 보인다.

대상항목인 NO<sub>x</sub>의 체류시간(life time)은 짧고[11] 모델링 기간이 길어질수록 기상장의 오차가 커져 대기화

학모델 결과의 불확실성이 커지기 때문[12]에 Case 1, 2 사례의 모델링 기간은 4일로 설정하였다.

#### 2. 배출량 산정 방법

환경부는 대기환경보전 정책수립과 관련 연구에 필요한 기초자료 제공을 위해 매년 대기오염물질(CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, VOC, NH<sub>3</sub>)에 대한 연간 배출량을 산정하고 있다.(대기정책수립지원시스템, CAPSS)[13] 대기화학모델의 주요한 입력 자료 등에 활용되고 있는 대기오염물질 배출량은 연료 사용량과 연소·공정에 따른 배출 계수를 이용하여, bottom-up 방식으로 산정하고 있다[14]. 이러한 상향식(bottom-up) 배출량 산정 방식은 사용되는 많은 통계 자료의 오차와 파악되지 않은 배출원의 누락 등 불확실성으로 인해 지속적으로 개선을 수행[15]하고 있으나, 검증에는 한계가 있다.

본 연구는 배출량 검증 방법 중 하나로 제시되고 있는 위성의 실측 NO<sub>2</sub> 전층 농도 자료를 이용, 하향식(top-down) 방식으로 배출량 자료를 개선하는 연구를 수행하였다. 또한, 짧은 NO<sub>x</sub>의 체류시간으로 인해 장거리 이동을 고려하지 않은 방법과 조밀한 격자의 배출량 산정에 필수적으로 고려되어야 하는 장거리 이동을 고려한 두 가지 방법론을 적용하였다.

##### 2.1 장거리 이동을 고려하지 않는 경우(method-1)

Martin et. al.은 GOME 위성으로부터 NO<sub>2</sub>의 배출량을 산정하는 방법을 제시하였다[16]. 해당 방법은 NO<sub>2</sub>와 같이 체류시간(lifetime)이 짧아 장거리 이동 영향이 적은 물질의 농도는 관측 지역에서 배출되는 물질의 배출량에 전적으로 의존한다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 즉, 지역의 NO<sub>2</sub> 농도와 해당물질의 체류시간과 관련된 계수로 배출량을 추정할 수 있으며, 배출량(Emi)과 농도(Con)는 아래의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Emi = \alpha \times Con \tag{1}$$

여기서 배출량과 농도의 선형적인 관계에 대한 계수(a)는 Geos-Chem과 같은 대기화학모델링을 통하여 산출하게 된다. NO<sub>x</sub>의 체류시간은 여름철 3~10시간을 넘

지 않으므로, 일반적으로 장거리이동의 영향이 적다고 추정할 수 있다. 각 지역별로 모델링으로부터 식(1)에 의해 해당 계수를 구한 다음 해당지역의 위성관측 농도 ( $Con_{satellite}$ )에 이 계수를 곱할 경우 위성 관측으로 배출량( $Emi_t$ )을 계산하게 된다.

$$Emi_t = \alpha \times Con_{satellite} \quad (2)$$

최종적으로 산정된 배출량(a posteriori  $Emi$ )은 위성으로부터 일차적으로 산정된 배출량( $Emi_t$ )과 모델링에 사용된 배출량 인벤토리( $Emi_a$ )로부터 계산되며 그것들의 상대적인 불확실성(relative uncertainty)에 의해서 아래의 식과 같이 가중된다( $\epsilon_a$ ).

$$\ln Emi = \frac{(\ln Emi_t)(\ln \epsilon_a)^2 + (\ln Emi_a)(\ln \epsilon_t)^2}{(\ln \epsilon_a)^2 + (\ln \epsilon_t)^2} \quad (3)$$

### 2.2 장거리 이동을 고려할 경우(method-2)

method-1의 배출량 산정 방법의 가장 큰 가정은 대기오염물질의 장거리 이동이 없음을 가정한 것으로 체류시간이 긴 대기오염물질이나, 연구 대상 영역이 조밀하여 짧은 체류시간에도 주변 영역에 영향을 줄 수 있는 경우, 상층 풍속이 강하여 장거리 이동이 존재할 경우 등에는 산정된 배출량의 오차율은 증가하게 된다. 특히 우리나라는 SO<sub>2</sub>, CO와 같은 대기오염물질의 40%, 39%가 장거리 영향을 받음[17]에 따라, 해당 항목의 배출량 산정에 장거리 이동 효과를 무시할 수 없으며 장

거리 이동 효과를 고려할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구는 이러한 수송으로 인한 농도 영향을 반영하기 위해 관심지역에 대한 주변지역의 장거리 이동 효과를 분석할 수 있는 배출원-수용지 관계식을 도입(method-2)하였다. 이 방법은 관심지역을 다수의 권역으로 구분, 배출원을 제거하거나 해당지역의 배출만 고려, 모델링 하여 배출지역의 영향을 산출하게 된다[18][19].

이러한 배출원-수용지 관계 도출을 위해 EMEP 방법과 위성관측을 이용하였으며, 관심지역 i번 지역에서 (2)식의  $\alpha_i$ 는 다음과 나타낼 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n H_{i,j} \times (Con_{satellite})_j}{\sum_{j=1}^n H_{i,j} \times (Con_{model})_j} \quad (4)$$

$$H_{i,j} = \frac{[\Delta Con] \times \left[ \frac{(Emi_{control})_i}{\Delta Emi_i} \right]}{(Con_{control})_i} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{while } \Delta Con &= (Con_{control})_i - (Con_{EMEP})_{i,j} \\ \Delta Emi_i &= (Emi_{control})_i - (Emi_{EMEP})_i \end{aligned}$$

여기서 ( $Con_{satellite}$ )<sub>i</sub>는 i격자의 위성관측 농도, ( $Con_{model}$ )<sub>i</sub>는 i격자의 모델링 농도,  $H_{i,j}$ 는 i격자에 대한 j격자의 기여율을 나타낸다.  $H_{i,j}$ 는 배출원-수용지 관계 도출 방법인 EMEP 방법에 따라, 관심지역인 i격자에 대하여 j격자의 배출량을 0%, 80%로 모델링을 수행한 후, 100%(control) 배출량을 사용한 모델링 결과와 비교, 차이를 분석하여 기여율을 산정하였다.

이렇게 (4), (5) 식에 의해 계산된  $\alpha$  값과 (3)식을 이용하여 최종 배출량을 산정하게 된다. 본 연구 사업에서는 배출량 산정 방법(Method-1, 2)에 따라 위성자료를 이용한 배출량을 시범 산정하고, 기존 상향식 배출량 자료와 비교 분석 연구를 하고자 한다.

### 3. 수도권 지역 NO<sub>2</sub> 농도의 외부 기여율 분석

해당 사례 기간 동안 EMEP 방법을 이용하여 수도권 지역 NO<sub>2</sub> 대기권 농도의 자체 및 외부 기여율 산정하여 그 결과를 [그림 2]에 제시하였다. 배출원-수용지 관

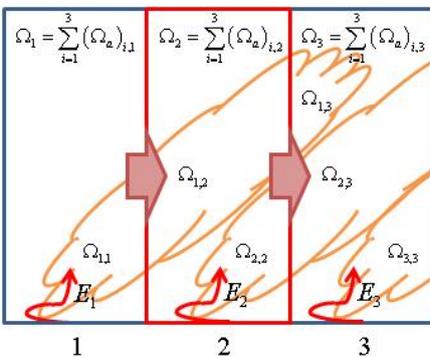


그림 1. EMEP 방법을 이용한 배출원-수용지 관계 모델도

계는 NO<sub>2</sub>의 비선형성을 고려하여 수도권 지역 배출량을 20% 저감한 입력 자료를 이용, 배출원-수용지 관계를 도출하였다.

Case 1의 경우, 자체 기여율은 40.6~56.2% 수준을 보였으며, 외부 기여율은 43.8~59.4% 수준을 보였다 ([그림 2] 상단). 그리고 사례기간 중 자체 기여율은 2월 4일에 56.2%로 가장 높은 수준을 보였으며, 2월 5일에 40.6%로 가장 낮은 수준을 보였다. 반면 외부 기여율은 2월 4일에 43.8%로 가장 낮은 수준을 보였고, 2월 5일에 59.4%로 가장 높은 수준을 보였다. 이는 자체 기여율이 높거나 외부 기여율이 낮으면 외부로부터 유입되는 양보다 그 지역에서 배출되는 배출량에 더 영향을 받을 것으로 판단된다. 그러나 Case 1의 경우 2월 4일을 제외한 모든 날에서 전반적으로 외부 기여율이 자체 기여율보다 상대적으로 높은 수준을 보여 외부의 영향을 무시 할 수 없는 것으로 판단된다.

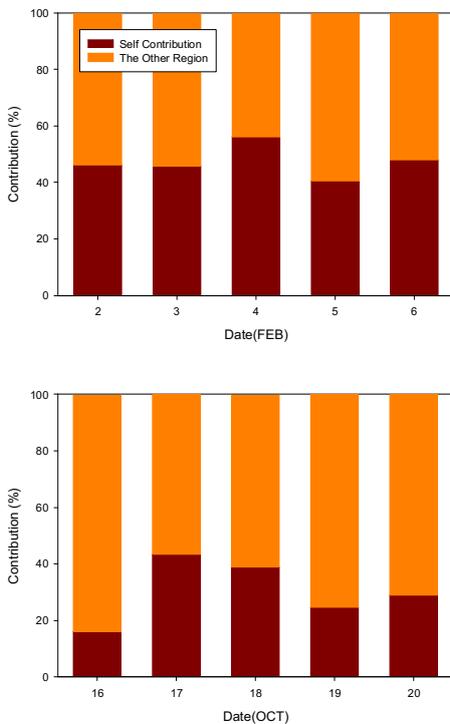


그림 2. 수도권 지역 NO<sub>2</sub> 농도 자체 및 외부 기여율 (상) Case 1, (하) Case 2.

Case 2의 경우, 자체 기여율은 16.1~43.4% 수준을 보였으며, 외부 기여율은 56.7~83.9% 수준을 보였다 ([그림 2] 하단). 그리고 사례기간 중 자체 기여율은 10월 17일에 43.4%로 가장 높은 수준을 보였으며, 10월 16일에 16.1%로 가장 낮은 수준을 보였다. 반면 외부 기여율은 10월 16일에 83.9%로 가장 높은 수준을 보였고, 10월 17일에 16.1%로 가장 낮은 수준을 보였다. 이는 Case 1과 마찬가지로 자체 기여율보다 외부 기여율이 좀더 높은 수준을 보여 외부로부터 유입되는 양이 그 지역에서 배출되는 배출량보다 많은 것으로 판단된다. 또한 Case 2의 경우 전반적으로 외부 기여율이 50% 이상으로 Case 1보다 외부의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

따라서 Case 1과 Case 2의 자체 및 외부 기여율 분석 결과, 모든 사례에서 외부 영향이 크게 나타남을 알 수 있었으며, 하향식 배출량 산정에 있어 선행 연구에서 사용한 Method-1은 장거리 영향을 반영하지 못하므로 본 연구에서는 Method-2를 적용하여 배출량을 산정하고자 한다.

#### 4. 입력 배출량 에러율(εa)

에러율은 배출량 산정에 있어 중요한 변수 중 하나로, 자료의 신뢰도에 따른 가중치를 주는 방법을 사용하였다. 위성의 경우 많은 연구들에서 대기오염물질에 따라 에러율을 분석하였으며 위성 자료 제공시 함께 제공하고 있다. 그러나 모델링 입력 배출량인 INTEX, TRACE/ACE, CAPSS 등에서 제공하는 배출량에 대한 에러율에 대한 연구는 아직까지 미비한 수준에 있다.

[표 2]는 NO<sub>x</sub> 배출량에 대한 에러율을 나타내는데 아시아 지역에 대한 에러율은 19~92% 수준으로 지역마다 편차가 심하며, 일본에서 가장 낮은 에러율을, 남아시아 지역에서 가장 높은 에러율을 보이고 있다[20]. 이러한 에러율은 배출량 산정에 사용되는 자료의 정확도에 따라 결정이 되는데, 대체적으로 통계적 체계가 잘 정립된 국가일수록 정확도가 높은 것을 알 수 있다.

표 2. NOx 배출량의 불확실성

| Region           | NOx |
|------------------|-----|
| China            | 23  |
| Japan            | 19  |
| Other East Asia  | 24  |
| Southeast Asia   | 92  |
| India            | 48  |
| Other South Asia | 63  |
| All Asia         | 37  |

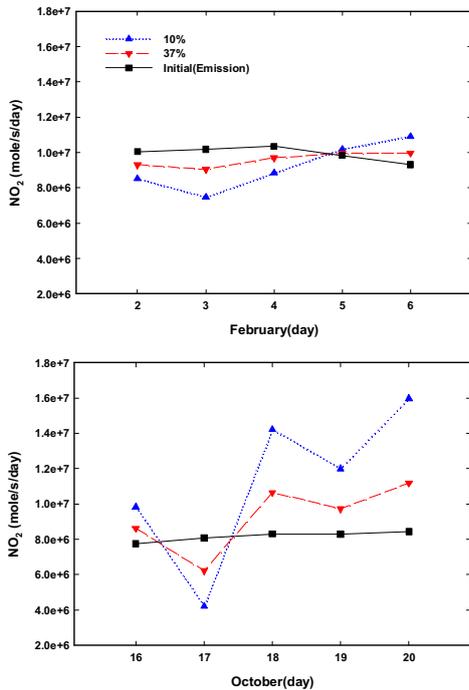


그림 3.  $\epsilon_a$  값에 따른 배출량 변화  
(상) Case 1, (하) Case 2.

[그림 3]는 입력 배출량의 에러율 변화에 따라 구해진 배출량의 변화를 나타내며, 본 연구에서는 에러율에 대하여 각각 10%와 37%를 적용하여 나타내었다. Case 1과 Case 2에서 에러율에 따라 배출량의 분포가 달라짐을 알 수 있으며, 특히 에러율이 10%일 때 변화폭이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급하였듯이 에러율에 따라 배출량을 산정하는데 있어 큰 차이를 보일 수 있다는 것이다. 본 연구의 최종 배출량 산정을 위해서 Streets et al., 2003에서 제시된 All Asia에 해당하는 37%를 적용하였다.

### 5. 수도권 지역의 배출량 산정

[그림 4]는 배출원-수용지 관계 분석 결과로부터 선정된 Method-2를 적용한 수도권 지역의 NO<sub>2</sub> 일 배출량 산정 결과이다.

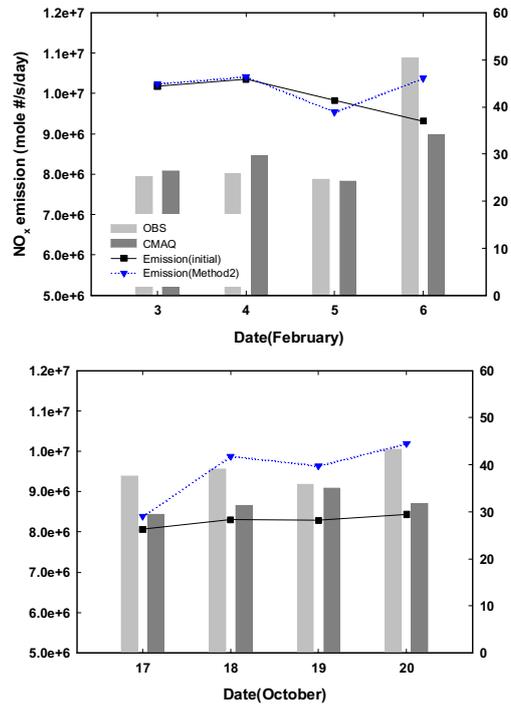


그림 4. 수도권 지역의 NO<sub>2</sub> 일 배출량  
(상) Case 1, (하) Case 2.

Case 1의 경우([그림 4] 상단), 초기 배출량으로 산정된 NO<sub>2</sub> 농도(진회색 막대)는 26.4, 29.6, 24.2, 34.1 ppm, 지상 관측 NO<sub>2</sub> 농도(연회색 막대)는 25.1, 25.8, 24.6, 50.4 ppm으로 유사한 패턴의 증·감소 경향을 보였다. 그러나 2월 4일과 2월 6일의 경우 농도의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 초기 배출량(검은색 실선)이 1.02×10<sup>7</sup>, 1.03×10<sup>7</sup>, 9.83×10<sup>6</sup>, 9.31×10<sup>6</sup> molec./s/day로 감소하는 경향을 보였으며, 초기 배출량이 일변화 패턴을 잘 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 Method-2를 적용한 배출량(파란색 점선)의 경우, 1.02×10<sup>7</sup>, 1.04×10<sup>7</sup>, 9.54×10<sup>6</sup>, 1.04×10<sup>7</sup> molec./s/day로 증·감소 경향이 잘 나타나고 있으며, 특히 2월 6일의 배출량 값의 경우 초기 배출량에 비해 상대적으로 큰

값을 보여, 지상 관측 자료의 변화 경향을 더 잘 반영하는 것으로 판단된다.

Case 2의 경우(그림 4 하단), 초기 배출량으로 산정된 NO<sub>2</sub> 농도(진회색 막대)는 29.4, 31.3, 35.0, 31.7 ppm, 지상 관측 NO<sub>2</sub> 농도(연회색 막대)는 37.6, 39.0, 35.8, 43.3 ppm으로 유사한 패턴을 보이지 않았으며, 지상 관측 NO<sub>2</sub> 농도가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 Case 1과 마찬가지로 초기 배출량(검은색 실선)이  $8.07 \times 10^6$ ,  $8.30 \times 10^6$ ,  $8.28 \times 10^6$ ,  $8.44 \times 10^6$  molec./s/day로 유사한 농도 분포를 보이며, 일변화 패턴을 잘 반영하지 못하고 있다. 따라서 Method-2를 적용한 배출량(파란색 점선)의 경우,  $8.39 \times 10^6$ ,  $9.87 \times 10^6$ ,  $9.64 \times 10^6$ ,  $1.02 \times 10^7$  molec./s/day로 증·감소 경향이 잘 나타나고 있으며, 전반적으로 초기 배출량에 비해 상대적으로 높은 값을 보였다. 한편 Case 2의 경우 Case 1 보다 초기 배출량과의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 Case 2가 Case 1 보다 자체 기여율이 낮으며 외부의 영향을 더 반영하여 나타난 것으로 판단된다. 따라서 Method-2로 산정한 배출량은 초기 배출량에 비해 지상 관측 자료의 변화 경향을 잘 반영하고 있으며, 대기화학모델 입력자료인 배출량 개선에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 수도권 지역만을 대상으로 배출량을 산정함에 따라 검증에 한계가 있으며, 추후 대상 지역을 확대하여 배출량을 산정하고 산정된 배출량을 이용한 제모델링을 통한 검증이 필요할 것으로 보인다.

또한, 본 연구에서 활용한 해의 저궤도 환경위성은 특성상 1일 1회 관측됨에 따라, 위성 자료는 1일 1회 이상의 반영이 불가능하여 NO<sub>2</sub>의 체류시간이 1일 이하일 경우 배출량 산정에 반영되지 않는 한계가 있다. 이러한 저궤도 환경위성의 한계는 현재 개발 중인 지구 정지궤도에서 운용되는 환경위성의 자료 산출이 가능하게 될 경우, 정밀한 배출량 산정을 위한 자료 확보가 가능할 것으로 기대된다.

#### IV. 결 론

본 연구의 배출량 산정 방법은 기존 방법인 통계자료

와 배출계수를 사용한 상향식 산정 방법이 아닌 대기화학모델 결과와 해의 저궤도 환경위성인 OMI에서 관측된 대기 중 미량기체 전층 농도를 비교, 입력자료인 배출량을 보정하는 하향식 산정 방법을 사용하여 수도권 지역에 대해 NO<sub>2</sub> 배출량을 시범적으로 산정하였다. 상향식 배출량 산정 방법이 아닌 하향식 배출량 산정 방법을 사용함에 따라 상향식 배출량 산정의 불확실성으로 작용하는 기초 통계자료, 배출계수 등의 오차에 대한 고려가 필요 없으며, 누락 배출원, 지역별 차이(도심/공단/자연지역) 또한 위성자료에 반영됨에 따라 상향식 배출량 산정의 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그러나, 위성자료를 이용한 배출량 개선 연구는 시작 단계로 기체 이동을 고려하지 않고 넓은 범위에서 장기간의 배출량을 산정하는 수준의 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기존 연구와 달리 기체의 이동과 도시 규모의 일단위 배출량을 산정을 시도하였다.

그 결과, 수도권 지역의 하향식 배출량 시범 산정에서 Case 1, 2 모두에서 자체 기여율 보다 외부 기여율이 크게 나타났으며, 이는 외부로부터 유입되는 양이 그 지역에서 배출되는 배출량보다 많은 것을 의미한다. 이러한 결과로 선행 연구 방법인 method-1은 장거리 영향을 반영하지 못하므로 본 연구사업에서 제시한 method-2를 적용하는 것이 바람직하다고 판단되어진다. Case 1, 2 모두 초기 배출량으로 산정된 NO<sub>2</sub> 농도는 지상 관측 NO<sub>2</sub> 농도와 유사한 패턴의 증·감소 경향을 보였으나, 농도의 차이가 크게 나타나며, 이는 초기 배출량 값이 일변화 패턴을 잘 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 반면 method-2를 적용한 배출량의 경우, 초기 배출량에 비하여 농도의 차이가 크지 않으며, 지상 관측 자료의 변화 경향을 더 잘 반영하는 것으로 나타났다. 따라서 method-2로 산정한 배출량은 초기 배출량에 비해 지상 관측 자료의 변화 경향을 잘 반영하고 있으며, 대기화학모델 입력자료인 배출량 개선에 활용할 수 있을 것으로 기대 된다. 그러나, 본 연구에서는 수도권 지역을 대상으로 함에 따라 배출량 산정 검증에는 한계가 있으며, 추후 대상 지역을 한·중·일을 포함하는 동북아 지역으로 확대하여 배출량을 산정하고 재

모델링을 통한 검증이 필요하다. 또한, 본 연구에서 사용된 OMI는 1일 1회 관측하는 저궤도 위성임에 따라 채류시간이 짧은 미량기체의 경우 위성 자료의 반영이 되지 않는 한계가 있다. 이는 시간별 관측이 가능한 정궤도 환경위성 운용될 경우, 극복이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 배출량 개선 방법론을 개발하고, NO<sub>2</sub>에 대한 배출량 개선을 시범적으로 적용하였으나, 향후 다른 미량기체(SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, HCHO 등)의 배출량 개선에도 적용 가능함에 따라 배출량 정확도와 위성 활용도가 높아질 뿐만 아니라 그에 대한 추가 연구 또한 활성화될 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Won Jun Choi, Kyung-Jung Moon, Jongmin Yoon, Ara Cho, Sang-kyun Kim, Seounghoon Lee, Dai ho Ko, Jhoon Kim, Myung Hwan Ahn, Deok-Rae Kim, Sang-Min Kim, Ji-Young Kim, Dennis Nicks, and Jeong-Su Kim, "Introducing the geostationary environment monitoring spectrometer," *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol.12, No.4, 2018.  
doi:10.1117/1.JRS.12.044005
- [2] P. F. Levelt, E. Hilsenrath, G. W. Leppelmeier, G. H. J. Van den Oord, P. K. Bhartia, J. Tamminen, J. F. De Hann, and J. P. Veefkind, "The Ozone Monitoring Instrument," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.44, No.5, pp.1199-1208, 2006.
- [3] <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>
- [4] K. F. Boersma, D. J. Jacob, M. Trainic, Y. Rudich, I. DeSmedt, R. Dirksen, and H. J. Eskes, "Validation of urban NO<sub>2</sub> concentrations and their diurnal and seasonal variations observed from the SCIAMACHY and OMI sensors using in situ surface measurements in Israeli cities," *Atmos. Chem. Phys.*, Vol.9, pp.3867-3879, 2009.
- [5] V. Sheel, S. Lal, A. Richter, and P. Burrows, "Comparison of satellite observed tropospheric NO<sub>2</sub> over India with model simulations," *Atmos. Environ.*, Vol.44, pp.3314-3321, 2010.
- [6] A. Richter, J. P. Burrows, H. N. β. C. Granier, and U. Niemeier, "Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space," *Nature*, Vol.437, pp.129-132, 2005.
- [7] R. J. Van der A, H. Eskes, K. F. Boersma, T. P. C. van Noije, M. Van Roozendaal, I. De Smedt, D. H. M. U. Peters, and E. W. Meijer, "Trends, seasonal variability and dominant NO<sub>x</sub> source derived from a ten year record of NO<sub>2</sub> measured from space," *J. geophys. Res.*, Vol.113, 2008.  
<https://doi.org/10.1029/2007JD009021>
- [8] 국립환경과학원, *기후변화에 따른 대기환경 영향 평가 모델 선정 연구* 국립환경과학원 연구과제 최종보고서, 2007.
- [9] 국립환경과학원, *기후 및 대기환경 통합시스템 구축 및 운영 III*, 국립환경과학원 연구과제 최종보고서, 2010.
- [10] D. Byun and J. K. S. Ching, *Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, United States Environmental Protection Agency Rep. EPA-600/R-99/030*, United States Environmental Protection Agency, 1999.
- [11] D. Schaub, D. Brunner, K. F. Boersma, J. Keller, D. Folini, B. Buchmann, H. Berresheim, and J. Staehelin, "SCIAMACHY tropospheric NO<sub>2</sub> over Switzerland: Estimates of NO<sub>2</sub> lifetimes and impact of the complex Alpine topography on the retrieval," *Atmos. Chem. Phys.*, Vol.7, pp.5971-5987, 2007.
- [12] Il-Soo Park, Won-Jun Choi, Tae-Young Lee, Suk-Jo Lee, Jin-Seok Han, and Cheol-Hee Kim,

“Simulation of long-range transport of air pollutants over Northeast Asia using a comprehensive acid deposition model,” Atmos. Environ., Vol.39, pp.4075-4085, 2005.

- [13] <http://airemiss.nier.go.kr/>
- [14] 국립환경과학원, 국가 대기오염물질 배출량 기초자료구축을 위한 표준업무절차서- 2015년 배출량 기준 -, 2018.
- [15] 국립환경과학원, 대기오염물질 배출자료 신뢰도 향상 및 통합 인벤토리 개선 연구국립환경과학원 연구과제 최종보고서, 2017.
- [16] R. V. Martin, D. J. Jacob, K. Chance, T. P. Kurosu, P. I. Palmer, and M. J. Evans, “Global inventory of nitrogen oxide emissions constrained by space-based observations of NO<sub>2</sub> columns,” J. Geophys. Res., Vol.108, Issue.D17, 2003. <https://doi.org/10.1029/2003JD003453>
- [17] 국립환경과학원, 동북아 대기오염 감시체제 구축 및 환경보전협력사업(XI), 국립환경과학원 연구과제 최종보고서, 2010.
- [18] 국립환경과학원, 환경위성을 활용한 기후변화 및 대기환경 감시(II), 국립환경과학원 연구과제 최종보고서, 2011.
- [19] 국립환경과학원, 환경위성을 활용한 기후변화 및 대기환경 감시(III), 국립환경과학원 연구과제 최종보고서, 2012.
- [20] D. G. Streets, T. C. Bond, G. R. Carmichael, S. D. Fernandes, Q. Fu, D. He, Z. Klimont, S. M. Nelson, N. Y. Tsai, M. Q. Wang, J. H. Woo, and K. F. Yarber, “An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000,” J. Geophys. Res., Vol.108, Issue.D21, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JD003093>

저자 소개

최 원 준(Won Jun Choi)

정회원



- 2002년 2월 : 연세대학교 천문대  
기과학과(이학사)
- 2004년 8월 : 연세대학교 대기과  
학과(이학석사)
- 2005년 9월 ~ 현재 : 국립환경  
과학원 환경연구사

<관심분야> : 환경위성탐체제, 환경위성정보 활용

정 부 전(Bujeon Jung)

정회원



- 2007년 2월 : 건국대학교 환경응  
용학과(공학사)
- 2009년 2월 : 건국대학교 환경응  
용학과(공학석사)
- 2011년 1월 ~ 2015년 4월 : 국립  
환경과학원 연구원

<관심분야> : 대기오염물질 배출량, 배출량 산정, 대  
기환경측정