

## MEGAN을 이용한 국내 BVOCs 배출량 산정: 2012년 6월 사례 연구

김경수, 이승재\*

국가농림기상센터

(2021년 12월 27일 접수; 2022년 3월 17일 수정; 2022년 3월 21일 수락)

### BVOCs Estimates Using MEGAN in South Korea: A Case Study of June in 2012

Kyeongsu Kim, Seung-Jae Lee\*

*National Center for Agro-Meteorology, Seoul 08826, Korea*

(Received December 27, 2021; Revised March 17, 2022; Accepted March 21, 2022)

#### ABSTRACT

South Korea is quite vegetation rich country which has 63% forests and 16% cropland area. Massive NO<sub>x</sub> emissions from megacities, therefore, are easily combined with BVOCs emitted from the forest and cropland area, then produce high ozone concentration. BVOCs emissions have been estimated using well-known emission models, such as BEIS (Biogenic Emission Inventory System) or MEGAN (Model of Emission of Gases and Aerosol from Nature) which were developed using non-Korean emission factors. In this study, we ran MEGAN v2.1 model to estimate BVOCs emissions in Korea. The MODIS Land Cover and LAI (Leaf Area Index) products over Korea were used to run the MEGAN model for June 2012. Isoprene and Monoterpenes emissions from the model were inter-compared against the enclosure chamber measurements from Taehwa research forest in Korea, during June 11 and 12, 2012. For estimating emission from the enclosed chamber measurement data. The initial results show that isoprene emissions from the MEGAN model were up to 6.4 times higher than those from the enclosure chamber measurement. Monoterpenes from enclosure chamber measurement were up to 5.6 times higher than MEGAN emission. The differences between two datasets, however, were much smaller during the time of high emissions. More inter-comparison results and the possibilities of improving the MEGAN modeling performance using local measurement data over Korea will be presented and discussed.

**Key words:** MEGAN, Biogenic emission, BVOCs, Isoprene, Monoterpenes



\* Corresponding Author : Seung-Jae Lee  
(sjlee@ncam.kr)

## I. 서 론

한국은 급격한 산업화와 도시화로 인해 대기오염 또한 급속도로 증가하여 왔다. 대기오염의 주요 발생원인은 산업, 발전, 수송, 난방 등으로 구분할 수 있으며 시대의 흐름에 따라 발생양상 또한 변해왔다. 1963년에 최초로 공해방지법이 제정되었으나, 경제성장주도의 정책에 의해 환경오염 문제는 가려졌다. 1970년대에는 CO (일산화탄소)와 SO<sub>2</sub> (이산화황)을 중심으로 대기오염측정을 시작하였으나, 여전히 정부는 대기질 관리에 소극적이었다. 그 후 경제개발계획의 성공과 더불어 각종 환경오염으로 인해 국민들의 인식이 높아지자 1977년 환경보전법을 제정하였고, 이 법을 통해 환경기준 및 총량규제 등을 규정하였다(Koo, 1979). 1978년에는 SO<sub>2</sub>에 대한 대기환경기준을 설정하였고, 1983년에는 CO, NO<sub>2</sub> (이산화질소), TSP(총먼지), O<sub>3</sub> (오존)에 대한 기준을 추가하였다. 이 후 정부는 청정 연료의 보급을 위해 기준 난방 및 취사용으로 사용되던 연탄을 대체하여 LNG 사용의무화 정책을 확대하였다(MOE, 1992). 이러한 노력으로 인해 배출원을 통해 직접 배출되는 SO<sub>2</sub>, TSP, CO 등의 1차형 대기오염 물질은 환경기준 이하로 유지되기 시작하였다.

반면, 그 배출원이 다르거나 대기 중 화학적, 물리적 반응을 통해 2차적으로 생성되는 선진국형 오염물질인 PM<sub>10</sub> (미세먼지), O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>는 환경기준을 초과하게 되어 정부는 1차(2005~2014년) 및 2차(2015~2024년) 수도권 대기환경관리 기본계획 수립을 통해 오염물질별 목표농도를 설정하였다. 그 결과 서울시의 경우 연평균 미세먼지 농도는 2004년 61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2012년 41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 감소하였다(NIER, 2020). 하지만, 2014년 미세먼지 평균농도가 46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하여 목표치인 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성하지 못하였고, 2019년 기준 42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 큰 감소가 나타나지 않았다. 뿐만 아니라 주요선진국 도시의 2019년 미세먼지 평균농도(런던 : 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 파리 : 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 도쿄 : 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , LA : 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다도 높게 나타났다(NIER, 2020). 또한, 과거에 비해 대기오염물질의 배출 특성이 더욱 다양화되고 그 메커니즘이 복잡해졌다. 그러므로 미세먼지 관리를 위해서는 미세먼지 생성에 영향을 미치는 NO<sub>x</sub> (질소산화물)와 VOCs (Volatile Organic Compounds, 휘발성유기화합물) 같은 물질의 배출량을 정확하게 산정하는 것이 중요하다. 미세먼지 생성 메커니즘에 따라 NO<sub>x</sub> 배출을 저감할 경우 미세먼지의 농도는 저감될 수 있으나

오존의 경우, 대기 중 VOCs/NO<sub>x</sub>의 비율에 따라서 농도가 증가할 수 있다. 이와 같이 광화학 생성과정을 통해 생성되는 대기오염 물질을 관리하기 위해서는 오염물질 생성의 전구체(precursor) 역할을 하는 VOCs와 같은 물질에 대한 정확한 정량적 파악이 필요하다.

VOCs는 대기 중에 존재하는 수많은 종류의 유기화합물을 나타내는 명칭으로 탄소와 수소로 구성된 탄화수소류 등과 같이 상온, 상압에서 기체상태로 존재할 수 있는 모든 유기물질이다. 그 중 BVOCs (Biogenic Volatile Organic Compounds)는 나무 등의 식생에서 배출되는 이소프렌, 테르펜, 알코올, 에스테르 등의 물질이며, 식물체 내의 온도 상승 및 잎의 구조와 기공의 개폐에 의한 식물자체의 동화작용으로 발생하는 것으로 알려져 있다(Niinemetts *et al.*, 2004). 과거 BVOCs의 전 지구적 배출에 대한 연구에 의하면 자연식생에 의해 배출되는 연간 VOCs 양은 1,150 Tg으로 인위적 활동에 의해 배출되는 연간 VOCs 양인 98 Tg보다 많다(Guenther *et al.*, 1995). 이와 같이 BVOCs (Biogenic Volatile Organic Compounds)의 배출량이 상대적으로 많기 때문에 식생에 대한 BVOCs 배출계수를 정확하게 파악하는 것은 BVOCs 배출량을 정량화 하는데 있어 중요하다(Niinemetts *et al.*, 2011).

BVOCs 배출량을 산출할 때 전 세계적으로 가장 많이 쓰이는 모델은 BEIS (Biogenic Emission Inventory System)와 MEGAN (Model of Emission of Gases and Aerosol from Nature) 이 있다. BEIS는 1980년대 미국에서 처음 개발되어 1990년대 BEIS2로 업데이트되었다(Pierce and Waldruff, 1991; Pierce *et al.*, 1998). MEGAN은 BEIS (Biogenic Emission Inventory System)의 후속 모델로, BVOCs 총 배출에서 많은 비율을 차지하고 있는 이소프렌(Isoprene) 및 모노테르펜(Monoterpene)을 제외한 다른 휘발성유기화합물(Methanol : 메탄올, Formaldehyde : 포름알데히드 등)의 배출량을 계산할 수 있다. 그리고 MEGAN은 2.1버전으로 업데이트되면서 새로운 알고리즘이 추가되어 기존 4개의 식생으로 분류되었던 입력자료를 16개로 확장하였고, 수목의 수관부를 5개의 층으로 나누어 에너지의 균형을 평가하고 빛과 온도조건을 계산할 수 있도록 하였다(Guenther *et al.*, 2012).

현재 국내에서는 국가 단위 BVOCs 배출량 인벤토리 구축에 대한 연구가 많지 않을 뿐만 아니라 BEIS2, MEGAN v2.04와 같이 비교적 오래된 알고리즘을 가진 모델을 이용해 연구를 진행하여 왔다. 그리고 국립

환경과학원에서 국내 BVOCs 배출량을 산출하는 모델은 외국의 배출계수를 대부분 사용하고 있고, 모델 입력자료로 사용되는 식생정보 또한 외국의 식생정보를 기준으로 국내의 식생과 매칭시킨 것들이 많아 BVOCs 배출량에 대한 불확실성이 큰 편이다. 그럼에도 불구하고, 국내에서 수행되고 있는 대기오염물질 배출목록(Emission Inventory)에 대한 연구는 인위적인 오염원을 우선적으로 실시하고 있기 때문에 식생에 의한 자연적 VOCs 배출에 대한 연구가 상대적으로 부족하다. BVOCs 배출은 오존, 2차 유기에어로졸 등과 같은 대기오염물질을 생성하는데 영향을 주기 때문에 정량적인 파악이 정확하게 이루어지지 않는다면 BVOCs 배출에 대한 높은 불확실성은 이를 바탕으로 한 화학수송모델의 정확성에 영향을 미쳐 결과적으로는 대기환경 개선정책에 불확실성이 높은 연구결과들이 반영될 수 있다. 특히 국내의 경우 국토면적의 약 63%가 산림이고, 16%가 농경지로 구성되어 있으므로 (KOSTAT, 2020; Korea Forest Service, 2020) 최신연구에 의한 배출 알고리즘이 반영되어 있는 MEGAN v2.1과 같은 모델의 사용 및 국내에 적합한 배출계수 개발, 실제와 가까운 토지피복자료의 활용을 통한 연구가 우선적으로 필요하다고 사료된다.

MEGAN 모델을 이용하여 전 지구적인 식생배출량을 산출한 연구는 다양하게 존재한다. Messina *et al.* (2016)은 2000~2009년 기간 동안 ORCHIDEE 모델과 MEGAN 모델을 이용하여 토지피복 유형에 따른 전 세계의 식생배출량을 비교하였고, Guenther *et al.* (2006; 2012)은 최초로 MEGAN을 이용하여  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  해상도로 2003년 전 지구의 이소프렌에 대한 월별 배출량을 산출하였다. 그리고 Sindelarova *et al.* (2014)은 1981~2010년까지 MEGAN에 MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) 기상 데이터를 결합하여 만든 MAGAN-MACC 모델을 이용하여 과거 30년 동안 장기간 전 지구 식생에서 배출되는 휘발성유기화합물에 대한 배출량을 산출하여, 말레이시아와 아마존의 열대우림에서 관측을 통해 배출된 BVOCs와의 비교를 실시하였다. Müller *et al.* (2008)은 MEGAN과 유럽중기예보센터(ECMWF)에서 제공된 기상모델을 결합하여 1995~2006년까지 전 지구의 연간 이소프렌 배출량을 산출하였다. 유럽지역을 대상으로는 MEGAN을 이용하여 3가지의 다른 토지피복 자료를 통해 이소프렌, 모노테르펜, 세스퀴테르펜(sesquiterpene), 기타 휘발성 유기화합물(other VOCs)

의 연간 배출량을 산출하여 모델링 인벤토리를 구축하였다(Oderbolz *et al.*, 2013). 아시아 지역의 경우 1979~2012년까지의 기간 동안 토지이용 변화에 따른 이소프렌의 배출량 변화를 MEGAN 모델을 이용하여 산출하였고(Stavarakou *et al.*, 2014), 국내에서는 BEIS2와 CORINAIR를 이용하여 이소프렌과 모노테르펜의 배출량을 연구한 사례가 있으며(Cho *et al.*, 2006), Kim *et al.* (2014)은 수도권지역(서울, 경기, 인천)에 대해 MEGAN을 이용하여 2008년 5월과 6월에 대해 토지피복 특성에 따른 이소프렌과 모노테르펜의 배출량 변화 특성에 대해 연구하였다. 또한, 국립환경과학원에서 2009년도를 대상으로 아시아 22개 국가에 대해서 MEGAN 모델을 이용하여 식생에서 배출된 10가지 화합물(Isoprene, Monoterpenes, Acetaldehyde, Methane, Methanol, Toluene, Ethylene, Ethene, Carbon monoxide)의 식생배출목록을 작성하였다(NIER, 2011). MEGAN 모델링 결과는 대기화학수송모델(CMAQ : Community Multiscale Air Quality Model, CAMx : Comprehensive Air Quality Model with Extension, WRF-Chem : Weather Research and Forecasting Chemistry 등)의 입력자료로 다수 활용되고 있다. Zhang *et al.* (2021)은 중국 동부 지역을 대상으로 MEGAN v1.0, v2.0, v3.0으로 버전별 BVOCs 배출량을 산출하여 WRF-Chem의 입력자료로 활용하였다.

따라서, 본 연구에서는 MEGAN을 통해 국내 BVOCs 배출량을 추정하고 기존 구축된 BVOCs 인벤토리 및 측정 데이터와의 비교를 통해 배출량 결과를 평가하여, 향후 국내 농경지와 산림지에 대한 BVOCs 배출량을 산출하고 WRF-Chem 등의 대기화학 수송모델의 입력자료로 적용하여 오존 및 미세먼지 농도 분석을 목표로 한다.

## II. 자료 및 방법

### 2.1. MEGAN 알고리즘

본 연구에서는 MEGAN v2.1 모델을 사용하였다. MEGAN v2.1은 기본적으로 식생의 표준상태(온도:  $30^\circ\text{C}$ , 광합성 광량자밀도:  $1,000 \mu\text{mol/s}$ )에서의 배출계수(emission factor)와 환경조건(온도, 광량, 잎의 나이 등)의한 활동도의 변화(activity factor)를 곱하여 배출량을 계산한다(Guenther *et al.*, 2012). MEGAN v2.1을 구성하는 알고리즘은 Eq. 1과 같다.

$$F_i = Y_i \sum_{j=1}^n [EF_{(ij)} \cdot A_j] \quad (\text{Eq. 1})$$

$F_i$  : 각 화학종(i)에 대한 배출속도,  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$   
 $Y_i$  : 각 화학종(i)에 대한 배출 활동도 계수  
 $EF_{ij}$  : 각 화학종(i) 및 식생유형(j)에 대한 배출계수,  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$   
 $A_j$  : 각 식생 유형(j)에 대한 격자별 식생 점유율

배출계수는 19개의 화합물(compound) 목록과 16개의 PFT(Plant Functional Type, 식생기능성 유형)에 대한 배출계수 값을 제공하고 있다. EF1~EF15에 대한 화합물별 PFT는 Table 1과 같다. EF16에 해당되는 Crop2는 EF15에 해당하는 Crop1과 식물생리학적으로 서로 다르지만 현재는 Crop1만 사용되고 있다 (Oleson *et al.*, 2010). MEGAN v2.1에서 사용되고 있는 PFT는 전 세계에 분포하는 개별 식생 종 (species)

**Table 1.** MEGAN2.1 biogenic emission classes and emission factors ( $\mu\text{g m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ) for each of the plant functional types (Guenther *et al.*, 2012)

Compound	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8	EF9	EF10	EF11	EF12	EF13	EF14	EF15
Isoprene	600	3000	1	7000	10000	7000	10000	11000	2000	4000	4000	1600	800	200	1
Myrcene	70	70	60	80	30	80	30	30	30	50	30	0.3	0.3	0.3	0.3
Sabinene	70	70	40	80	50	80	50	50	50	70	50	0.7	0.7	0.7	0.7
Limonene	100	100	130	80	80	80	80	80	60	100	60	0.7	0.7	0.7	0.7
3-Carene	160	160	80	40	30	40	30	30	30	100	30	0.3	0.3	0.3	0.3
t-β-Ocimene	70	70	60	150	120	150	120	120	90	150	0	2	2	2	2
β-Pinene	300	300	200	120	130	120	130	130	100	150	100	1.5	1.5	1.5	1.5
α-Pinene	500	500	510	600	400	600	400	400	200	300	200	2	2	2	2
Other Monoterpenes	180	180	170	150	150	150	150	150	110	200	110	5	5	5	5
α-Farnesene	40	40	40	60	40	60	40	40	40	40	40	3	3	3	4
β-Caryophyllene	80	80	80	60	40	60	40	40	50	50	50	1	1	1	4
Other Sesquiterpenes	120	120	120	120	100	120	100	100	100	100	100	2	2	2	2
232-MBO	700	60	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Methanol	900	900	900	500	900	500	900	900	900	900	900	500	500	500	900
Acetone	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	80	80	80	80
Bidirectional VOCs	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	80	80	80	80
Stress VOCs	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Other VOCs	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140

EF1 : Needleleaf Evergreen Temperate Tree(온대상록침엽수), EF2 : Needleleaf Evergreen Boreal Tree(한대상록침엽수)  
 EF3 : Needleleaf Deciduous Boreal Tree(한대낙엽침엽수), EF4 : Broadleaf Evergreen Tropical Tree(열대상록활엽수)  
 EF5 : Broadleaf Evergreen Temperate Tree(온대상록활엽수), EF6 : Broadleaf Deciduous Tropical Tree(열대낙엽활엽수)  
 EF7 : Broadleaf Deciduous Temperate Tree(온대낙엽활엽수), EF8 : Broadleaf Deciduous Boreal Tree(한대낙엽활엽수)  
 EF9 : Broadleaf Evergreen Temperate Shrub(온대상록활엽관목), EF10 : Broadleaf Deciduous Temperate Shrub (온대낙엽활엽관목)  
 EF11 : Broadleaf Deciduous Boreal Shrub(한대낙엽활엽관목), EF12 : Cold C3 Grass(한대C3초지)  
 EF13 : Cool C3 Grass(냉대C3초지), EF14 : Warm C4 Grass(난대C4초지), EF15 : Crop1(농작물)

으로부터 얻은 데이터를 목록화하여 비슷한 유형의 식생들로 분류하였다(Guenther *et al.*, 2012). 또한 PFT별 배출계수는 Enclosure Chamber, REA (Relaxed Eddy Accumulation), 항공기를 통해 측정한 각 물질별 BVOCs 값을 바탕으로 하여 만든 것이다(Guenther *et al.*, 2012).

**2.2. MEGAN 모델링 프로세스**

MEGAN v2.1 모델링 수행을 위한 처리단계는 크게 4단계로 구분할 수 있다. 첫째, 모델링 대상 구역에 대한 토지피복(Land Cover), 엽면적지수(Leaf Area Index), 배출계수 자료를 CSV (Comma Separated Values, 쉼표로 구분한 값) 형태로 변환한다. 둘째, 기상모델(WRF : Weather Research and Forecasting, MM5 : Mesoscale Meteorological Model 5 등)을 구동하여 얻은 결과자료를 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)을 통해 필요한 부분을 추출하여 모델에 적합한 형태로 바꾸어 준다. 셋째, 각 과정에서 입력된 데이터들을 기반으로 배출 활동도(emission

activity factor) 값을 계산한다. 넷째, 화학종분화(chemical speciation)를 거쳐 휘발성유기화합물의 배출량을 산출한다(Fig. 1).

**2.3. 연구 대상지 및 모델링 수행방법**

본 연구에서는 MEGAN v2.1을 통해 2012년 6월 국내에서 배출된 BVOCs를 산출하기 위해 토지피복 자료는 Aqua/Terra 인공위성에 탑재되어 있는 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)의 2012년도 자료(MCD12Q1\_Type5, Plant Functional Type)를 MEGAN v2.1에 적합한 CSV 형태로 변환하였고, 엽면적지수 자료는 8일 주기로 생성되는 MODIS의 2012년 MCD15A2를 CSV (Comma Separated Values) 형태로 변환하였으며 배출계수는 모델에 탑재되어 있는 기본 값을 사용하였다(Table 2).

기상입력자료는 WRF의 기상모델의 결과 값을 MCIP 처리를 통해 MEGAN v2.1에 적합한 형태로 변환된 자료를 사용하였다. 사용된 WRF의 모델 버전은 3.7.1이고, 모델과 관련한 세부사항은 Table 3과

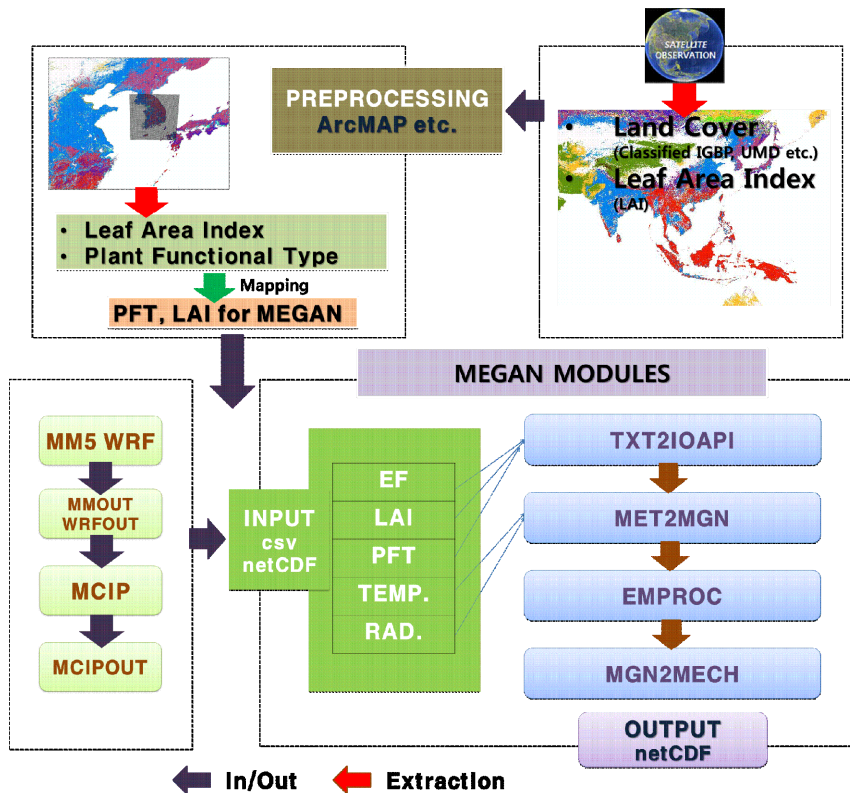


Fig. 1. MEGAN v2.1 Framework(Kim *et al.*, 2013)

**Table 2.** MEGAN v2.1 Input Data

Data	Source	Spatial resolution	Temporal resolution
Land Cover	MODIS(MCD12Q1)	500 m	1 year
Leaf Area Index	MODIS(MCD15A2)	1,000 m	8 days
Emission Factor	MEGAN v2.1	-	-

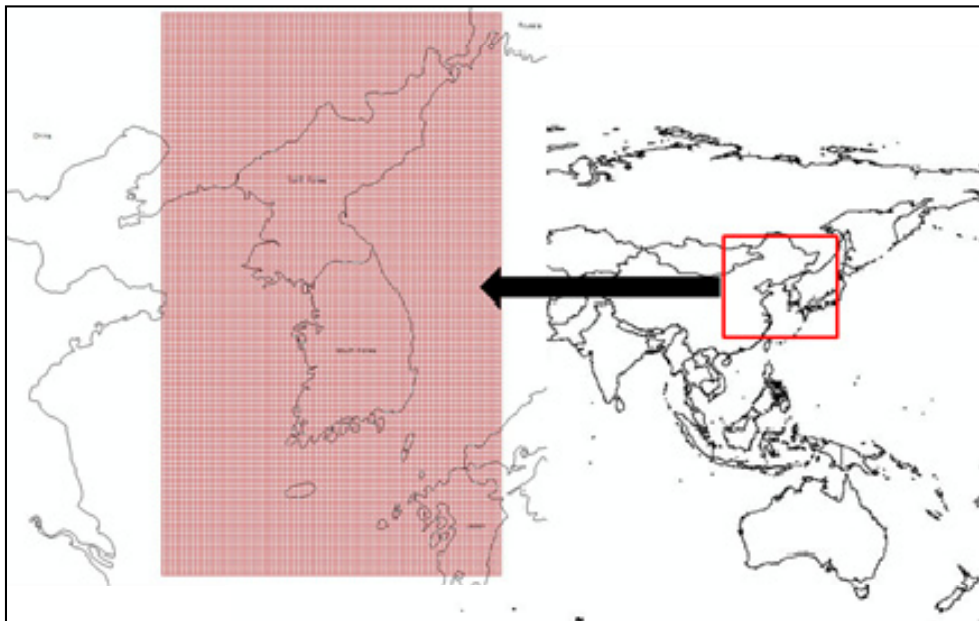
**Table 3.** Meteorological model configuration

Item	Description
Version	WRFv3.7.1
Horizontal grid	91 × 145 (dx = dy = 9 km)
Vertical grid	32 layers
NCEP data	1 degree, 6 hourly
Topography data	30s USGS
Microphysics	WSM6 (WRF Single-Moment 6-class)
Radiation physics	Shortwave : Dudhia scheme Longwave : RRTM scheme (Rapid Radiative Transfer Model)
PBL physics	YSU scheme
Cumulus physics	Kain-Fritsch scheme
Surface physics	Unified Noah land-surface model

같다.

Fig. 2는 MEGAN v2.1 모델링을 수행하기 위한 도메인으로 공간적 범위는 북위 31.43~43.70°, 동경 123.15~132.10°, 수평 격자수는 X축 91개, Y축 145개를 구성하였고, 격자 해상도는 9 km × 9 km로 설정하였으며 지도 투영체계는 람베르트 정각원추도법 (Lambert conformal conic projection)을 적용하였다.

MEGAN v2.1 모델을 통해 산출된 BVOCs 배출량과 현장에서 관측된 BVOCs 배출량 비교를 위해 국립환경과학원에서 경기도 광주시 도척면 상림리 산17-8번지 일대에서(Fig. 3) 2012-6-11 15:00~6-12 15:00까지 24시간 동안 3시간 단위로 챔버(enclosure chamber)를 통해 BVOCs 배출을 측정하였다. 태화산은 서울 근교에 위치한 도심지역으로 산림이 비교적 많이 분포하여 도심지역에서 발생한 NO<sub>x</sub>와 산림에서 생성된 BVOCs가 결합하여 오존이 생성될 가능성이 높은 지역이다. Kim *et al.*(2013)에 의하면 WRF-Chem

**Fig. 2.** Definition of MEGAN v2.1 modeling domain



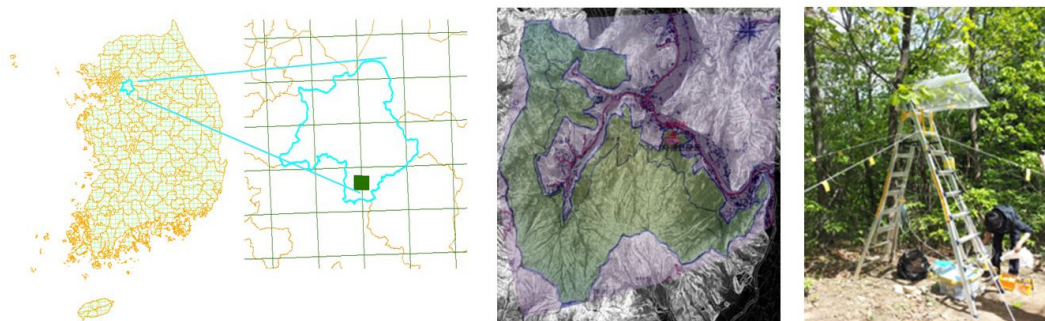


Fig. 3. BVOCs (Isoprene, Monoterpenes) measurement site in Taehwa mountain

을 통해 BVOCs 배출량을 고려하였을 때 오존농도가 5~20 ppb 높게 나타났다. 태화산 측정실험 대상지 일대의 식생분포는 소나무 185.3 ha(24%), 잣나무 174.6 ha(22%), 신갈나무 418.7 ha(54%)로 이루어져 있었다. 측정은 신갈나무 1본, 잣나무 1본에 대해 실시하였는데, 신갈나무에 대해서는 이소프렌을 측정을 실시하였고 잣나무에 대해서는 모노테르펜 측정을 실시하였다. 이소프렌은 주로 활엽수에서 배출되는 것으로 알려져 있고(Rasmussen and Went, 1965) 모노테르펜은 주로 침엽수에서 배출되는 것으로 알려져 있다(Laffineur *et al.*, 2011). 실험에 사용된 enclosure chamber는 Fig. 3과 같이 테들러백(Tedlar bag 80L, SKC, USA)

으로 수목의 가지를 밀봉하여 챔버 내부의 PAR (photosynthetically active radiation: 식물이 광합성에 이용하는 400~700 nm 사이의 유효광합성량)과 온도를 측정한다. 그리고 대기 성분과 비슷한 가스를 일정한 속도로 챔버 안으로 공급한 후 흡착관을 통해 시료를 채취한다.

### III. 결과 및 고찰

MEGAN v2.1을 통해 2012년 6월의 국내 BVOCs 배출량을 산출한 결과 이소프렌은 10, 495 ton, 모노테르펜은 2,709 ton이 발생하였고, BVOCs 배출의 공간

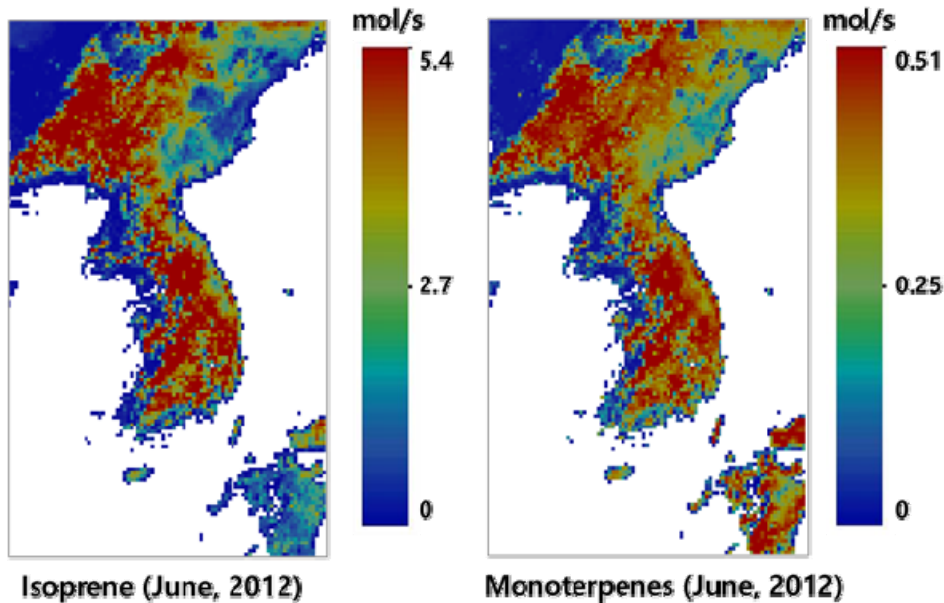


Fig. 4. The spatial distribution of Isoprene and Monoterpenes calculated with MEGAN

분포는 Fig. 4와 같다. 국내 BVOCs 배출은 주로 산림 지역에서 많이 발생하였고, 시가지 또는 농경지에서는 상대적으로 배출이 작게 나타났다.

본 연구를 통해 산출된 BVOCs 배출량 결과의 타당성 검증에 위해 기존 수행된 연구와 비교를 실시하였다. Cho *et al.*(2006)는 2000년도를 대상으로 하여 BEIS2와 CORINAIR를 활용한 국내의 BVOCs 배출량을 산출하였고, 그 결과 해당년도 6월에 배출된 이소프렌은 약 24,000 ton, 모노테르펜은 약 25,000 ton으로 나타났다. 본 연구에서 MEGAN v2.1을 활용한 배출량은 기존 대비 이소프렌의 경우 약 2.3배, 모노테르펜의 경우 9.2배 낮게 나타났다. 이와 같은 배출량 차이는 두 모델의 구동시점에서의 일사량 및 기온 등 기상 조건의 차이가 BVOCs 배출에 영향을 주었다고 할 수 있다(Tingey *et al.*, 1979; Tingey *et al.*, 1980; Owen *et al.*, 2002; Tarvaine *et al.*, 2005; Guenther *et al.*, 2006).

그리고 토지피복, 식생배출계수, 엽면적지수 등 모델입력 자료의 차이와 모델 알고리즘 등이 다르기 때문에 배출량의 차이가 발생한 것으로 판단된다. BEIS는 활엽수와 침엽수에 대해 BVOCs 배출량을 과다 모의하는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2014). BEIS는 MEGAN 이전에 BVOCs 배출량을 산출하는데 주로 사용됐던 모델로 알고리즘은 Guenther *et al.*(1994)이 제안한 방법에 기초하고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 MEGAN과의 알고리즘 차이는 크게 3가지로 나눌 수 있다(Pouliot and Pierce, 2009). 첫째, MEGAN의 식생별 배출계수는 수목의 수관(canopy) 기준으로 배출계수를 산출하지만, BEIS는 수목의 잎(leaf)단위로 배출계수를 산출한다. 둘째, MEGAN은 일사량과 온도 등이 수관층 상단부와 수관층 내부에 도달할 때의 환경을 매개변수화하여 배출량을 산출하는 반면, BEIS는 수관 상단부에 도달하는 일사량과 온도만을 고려한다. 셋째, MEGAN은 엽면적지수를 8일마다 계산하여 수목 잎의 생장과 노화에 따른 배출량을 고려하지만, BEIS는 이러한 것을 고려하지 않는다.

CORINAIR는 유럽연합(EU)에서 BVOCs 배출량을 산출할 때 사용하는 산정지침으로 Guenther *et al.*(1994) 제안한 방법을 수정하여 배출량을 산출한다(EEA, 1999). CORINAIR는 배출량을 산정하는데 있어 다음과 같은 가정을 기초로 하고 있다. 첫째, 수관층의 일사량과 온도는 수관층 내의 일사량 및 온도의 근사값이다. 둘째, 온도보정인자는 매시간의 기온을 대신하여 월평균 기온을 근사값으로 추정한다. 셋째, 일

사량 보정계수는 낮 시간대에 1, 밤 시간대에는 0을 부여하고, 낮 시간은 일사량이  $200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  이상인 시간이다. CORINAIR는 BEIS와 유사한 알고리즘을 채택하고 있기 때문에 MEGAN과 CORINAIR의 배출 알고리즘 차이는 위에서 언급한 BEIS와의 알고리즘 차이에 대한 설명과 같다.

다음 Eq. 2, Eq. 3은 BEIS와 CORINAIR의 BVOCs 배출량 산출방법이다.

#### • 이소프렌(Isoprene)

$$I = I_s \cdot C_L \cdot C_T$$

$$C_L = \frac{\alpha C_{L1} L}{(1 + \alpha^2 L^2)^{0.5}}$$

$$C_T = \frac{\exp\left[\frac{C_{T1}(T-T_s)}{RT_s T}\right]}{1 + \exp\left[\frac{C_{T2}(T-T_m)}{RT_s T}\right]} \quad (\text{Eq. 2})$$

I : 이소프렌 배출속도

$I_s$  : 표준상태에서의 이소프렌 배출속도(온도 : 30°C, 유효광합성량 :  $1,000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

$C_L$  : 일사량 보정상수

$C_T$  : 온도 보정상수

L : 유효광합성량( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

T : 온도(K)

$T_s$  : 표준상태에서의 온도(303K)

$T_m$  : 경험에 의한 계수(314K)

$\alpha$  : 경험에 의한 계수(0.0027)

$C_{L1}$  : 경험에 의한 계수(1.066)

R : 기체상수( $8.314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ )

$C_{T1}$  :  $95,000 \text{ Jmol}^{-1}$

$C_{T2}$  :  $230,000 \text{ Jmol}^{-1}$

#### • 모노테르펜(Monoterpene) 및 기타 VOCs

$$M = M_s \cdot \exp[\beta(T - T_s)] \quad (\text{Eq. 3})$$

M : 모노테르펜 배출속도

$M_s$  : 표준상태에서의 모노테르펜 배출속도(온도 : 30°C)

$\beta$  : 경험에 의한 계수(0.09)

T : 온도(K)

$T_s$  : 표준상태에서의 온도(303K)



모델링 간 BVOCs 배출량과 비교와 더불어 MEGAN v2.1을 통해 계산된 BVOCs 값의 검증을 위해 모델 결과 값에서 현장관측지를 포함하는 격자를 추출하여 관측 값과 배출량을 비교하였다. 챔버에서의 BVOCs 배출속도는 단위 시간당 수목의 잎에서 배출되는 탄소의 양으로 나타내며 Eq. 4와 같이 구할 수 있다.

$$ER (\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{ h}^{-1}) = \frac{\text{total flow rate (L h}^{-1}) \times \text{sample concentration } (\mu\text{gC L}^{-1})}{\text{total dry weight of leaves (gdw)}} \quad (\text{Eq. 4})$$

ER (Emission Rates) : BVOCs 배출속도  
 total flow rate : 단위시간당 전체 유량  
 sample concentration : 시료의 탄소농도  
 gdw (gram dry weight) : 단위 건중량

Eq. 4에서의 BVOCs 배출속도는 수목 일부분에서 배출되는 배출량이기 때문에 수목 또는 산림 단위의 배출량을 산출하기 위한 방법으로는 적합하지 않다 (Kim, 2001b). 그래서 토지면적 당 BVOCs 배출량을 비교하기 위해서는 Eq. 5와 같이 수목의 엽생체량 (foliar biomass density)을 산출하여야 한다. 엽생체량은 비엽중량(specific leaf weight)과 엽면적지수의 곱으로 계산할 수 있고, 배출속도(emission flux)는 Eq. 6와 같이 chamber의 배출속도와 엽생체량의 곱으로 구할 수 있다.

$$\text{FBD (gdw m}^{-2} \text{ area)} = \text{SLW (gdw m}^{-2} \text{ leaf)} \times \text{LAI (m}^2 \text{ leaf m}^{-2} \text{ area)} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{EF } (\mu\text{gC m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = \text{ERs } (\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{ h}^{-1}) \times \text{FBD (gdw m}^{-2} \text{ area)} \quad (\text{Eq. 6})$$

FBD (Foliar Biomass Density) : 엽생체량

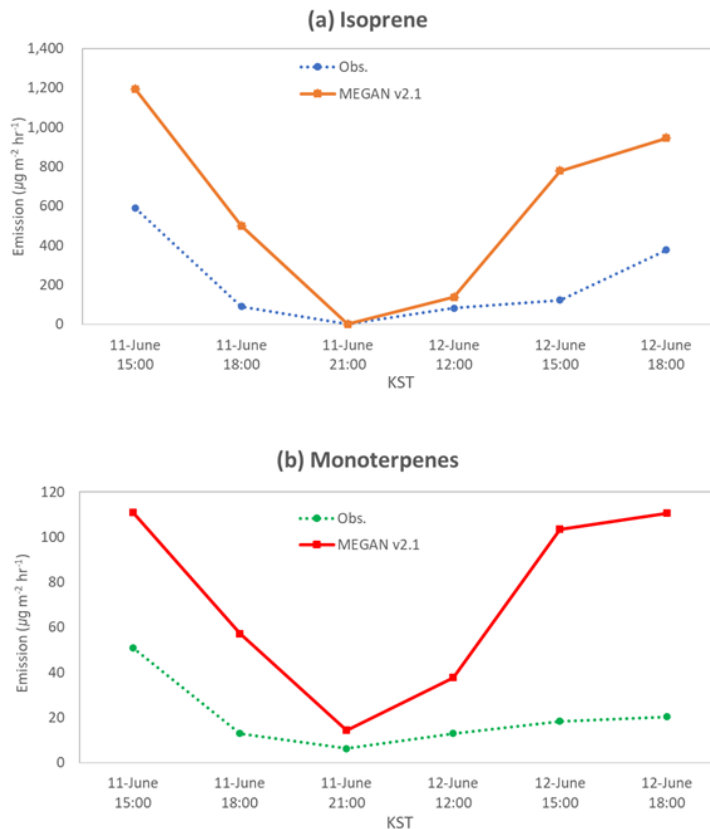


Fig. 5. Time series of (a) Isoprene and (b) Monoterpenes emission ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ ) between calculated and measured data for the period of 11 to 12 June 2012 (KST) in Taewha Mountain

SLW (Specific Leaf Weight) : 비엽중량  
 LAI (Lear Area Index) : 엽면적지수  
 EF (Emission Flux) : 토지 면적당 수목의 BVOCs 배출량  
 ERs (standard Emission Rates) : 잎 건중량 당 표준 상태(온도 : 30°C, 유효광합성량 : 1000  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )에서의 배출속도

Fig. 5는 이소프렌과 모노테르펜에 대해 MEGAN v2.1 모델링을 통한 배출량 결과 값과 경기도 광주시 태화산 현장에서의 측정 값을 비교하여 시계열 형태로 나타낸 것이다. 신갈나무 2본에 대한 이소프렌의 평균 배출량은 모델과 측정 값 사이에 6월 12일 오후 3시경 최대 6.4배의 차이가 나타났으나 오후 3시를 제외한 나머지 시간대에서는 비슷한 배출 경향을 나타내었다. 잣나무 1본과 소나무 1본에 대한 모노테르펜 배출량은 MEGAN v2.1 모델이 측정 값과 비교하여 모든 시간대에 걸쳐 과다하게 모의하는 것으로 나타났으며, 6월 12일 오후 3시에 최대 5.6배의 차이가 나타났다. 이는 MEGAN v2.1의 토지피복 입력자료로 사용된 MODIS PFT 자료를 통해 측정 실험 대상지와 식생을 비교한 결과 MODIS는 대상지를 대부분 낙엽활엽수(75%)와 초지(8%)로 분류하여 침엽수 식생이 약 46%를 차지하는 실제의 식생분포와는 많은 차이를 나타내었다. 이와 더불어 엽면적지수 자료와 식생별 BVOCs 배출계수 또한 국내의 측정 자료를 기반으로 한 배출계수가 아니고, 모델 격자의 평균값과 특정 지점 측정 값의 공간 규모 차이 때문에 배출량의 차이가 발생한 것으로 판단된다. Jang *et al.*(2020)에 의하면 MODIS LAI 자료는 LAI 값을 과소 추정하는 것으로 알려져 있다. 향후 MEGAN v2.1 모델을 활용한 국내 BVOCs 배출량 산출시, 배출량을 좀더 정확하게 추정하기 위해서는 한국지역에 적합한 토지피복, 엽면적지수 및 식생타입에 따른 배출계수 등의 자료가 필요하다고 사료된다.

#### IV. 결 론

수목 등과 같이 식생에서 배출되는 휘발성유기화합물(BVOCs)은 인간의 인위적 활동에 의해서 배출되는 휘발성유기화합물(AVOCs)보다 많은 것으로 알려져 있고, 이렇게 발생하는 휘발성유기화합물은 오존, 미세먼지 등과 같은 대기오염물질 생성에 관여하여 그 중요

성이 부각되고 있다. 그러나 현재 국내에서는 전체 국토면적 중 산림이 63%에 달함에도 불구하고 식생에 기반한 휘발성유기화합물 배출량 산출에 대한 연구는 미비한 실정이다. 기존 연구에서는 배출량을 산정하는데 비교적 오래된 알고리즘이 적용된 모델을 사용하여 국내의 현실을 반영하기가 힘들다. 또한 수목의 일부 수종을 제외한 대부분의 수종에 대해서는 외국의 배출계수를 사용하고 있고, 개발된 배출계수도 잎면적 단위의 배출계수를 사용하고 있기 때문에 산림생태계 또는 수목 단위로 개발된 배출계수는 전무한 실정이다. 따라서, 향후 토지피복과 식생 배출계수 등의 변화에 따른 BVOCs배출량 인벤토리를 구축하고, 구축된 인벤토리를 기반으로 오존, 미세먼지 등과 같은 2차 대기오염물질에 관한 연구를 실시하여 그 연구결과들을 국가 대기오염관련 정책의 참고자료로 활용할 때 유용할 것이라 기대된다. 또한, 대기화학수송 모델을 이용하여 대기오염 농도를 예측할 때, 모델이 시·공간적으로 대기오염 현상을 좀 더 현실적으로 모사할 수 있도록 모델의 알고리즘 개선에도 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 적 요

한국은 국토의 약 63%가 산림으로 구성되어 있고, 16%가 농경지로 구성되어 있어 도심에서 발생하는 NOx가 산림지역과 농경지에서 발생하는 BVOCs와 결합하여 오존을 생성할 가능성이 높다. 그래서 본 연구에서는 한국의 자연 식생 BVOCs 배출을 추정하기 위해 MODIS의 토지피복 자료와 엽면적지수 자료를 이용하여 입력자료를 생성한 후 MEGAN 모델로 BVOCs의 주요 배출 물질인 이소프렌과 모노테르펜을 대상으로 2012년 6월 한 달 간 모델링을 실시하였다. 그 결과, 해당기간 동안 이소프렌은 10,495 ton, 모노테르펜은 2,709 ton이 배출되었다. 기존 국내에서 BEIS와 CORINAR를 이용하여 연구된 이소프렌의 배출량은 약 24,000 ton, 모노테르펜은 25,000 ton으로 나타났는데, 본 연구와 배출량 차이가 나타난 주된 이유는 모델 알고리즘 차이와 모델 구동 시점에서의 일사량과 기온 등 기상 조건의 차이에 의한 것으로 추정된다. 그리고 모델링 결과와 측정 값의 비교를 위하여, 6월 11일부터 12일까지 이틀 간에 걸쳐, 한국 태화산에서 활엽수의 이소프렌과 침엽수의 모노테르펜 챔버 측정 값을 항공라이다와 방형구 식생자료를 기반으로 산정된 엽생체량 값을 이용하여 산림 단위의 BVOCs 배출량으로 환

산하였다. 태화산 지역에서의 MEGAN 모델과 측정 간 BVOCs 배출량을 비교한 결과, 시간적인 배출 경향은 유사했으나 이소프렌은 MEGAN 모델에서 최대 6.4배 정도 배출량이 높게 나타났고, 모노테르펜은 최대 5.6배 정도 배출량이 높게 나타났다. MODIS에서 제공되는 토지피복 자료가 한국의 토지피복 특성을 잘 반영하지 못함에도 불구하고 MEGAN 모델링 결과가 측정 값과 다른 모델에 비해 상대적으로 큰 차이를 보이지 않은 것은 MEGAN 내에 기온, 일사량 등에 의해 식생의 BVOCs 배출량을 변환시키는 파라미터들이 현실을 비교적 적절하게 반영하고 있는 것으로 사료된다. 본 연구는 국내의 BVOCs 배출량을 MEGAN 모델을 활용하여 산정하였고, 산림지에서의 실측 자료와 비교를 통해 배출량을 평가하였다는데 의의가 있으며, 산림과 대기 간의 BVOCs 상호작용 연구에 작은 도움이 될 것으로 기대된다. 국내 BVOCs 배출량을 더 정확하게 추정하기 위해서는 지형과 식생의 특성을 더욱 최신으로 반영한 토지피복 및 엽면적지수 자료의 이용, 그리고 수목 및 농작물 등과 같이 개별 식생에 따른 배출계수 등의 대한 연구가 향후에 심도 있게 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 ‘미세먼지에 의한 농작물 생산피해 예측 및 평가기술 개발’ (세부과제번호: PJ014189032019)의 지원을 받아 이루어진 것입니다.

## REFERENCES

- Arnth, A., Ü. Niinemets, S. Pressley, J. Bäck, P. Hari, T. Karl, S. Noe, I. C. Prentice, D. Serça, T. Hickler, A. Wolf, and B. Smith, 2007: Process-based estimates of terrestrial ecosystem isoprene emissions: Incorporating the effects of a direct CO<sub>2</sub>-isoprene interaction. *Atmospheric Chemistry and Physics* **7**(1), 31-53. doi: 10.5194/acp-7-31-2007.
- Arnth, A., G. Schurgers, J. Lathiere, T. Duhl, D. J. Beerling, C. N. Hewitt, M. Martin, and A. Guenther, 2011: Global terrestrial isoprene emission models: Sensitivity to variability in climate and vegetation. *Atmospheric Chemistry and Physics* **11**(15), 8037-8052. doi: 10.5194/acp-11-8037-2011.
- Atkinson, R., and J. Arey, 2003: Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: A review. *Atmospheric Environment* **37** 197-219.
- Bai, J. H., B. Baker, B. S. Liang, J. Greenberg, and A. Guenther, 2006: Isoprene and monoterpene emissions from an Inner Mongolia grassland. *Atmospheric Environment* **40**(30), 5753-5758.
- Baker, B., J.-H. Bai, C. Johnson, Z.-T. Cai, Q. J. Li, Y.-F. Wang, A. Guenther, J. Greenberg, L. Klinger, C. Geron, and R. Rasmussen, 2005: Wet and dry season ecosystem fluxes of isoprene and monoterpenes from a southeast Asian secondary forest and rubber tree plantation. *Atmospheric Environment* **39**(2), 381-390.
- Cho, K. T., J. C. Kim, and J. H. Hong, 2006: A study on the comparison of biogenic VOC (BVOC) emissions estimates by BEIS and CORINAIR methodologies. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **22**(2), 167-177.
- Derwent, R. G., M. E. Jenkin, N. R. Passant, and M. J. Pilling, 2007: Photochemical ozone creation potentials (POCPs) for different emission sources of organic compounds under European conditions estimated with a Master Chemical Mechanism. *Atmospheric Environment* **41**(12), 2570-2579.
- EEA, 1999: *EMEP/CORINAIR CORINAIR Emission Inventory Guidebook*. Group 11, 3<sup>rd</sup> ed.
- Geron, C., P. Harley, and A. Guenther, 2007: Isoprene emission capacity for US tree species. *Atmospheric Environment* **35**(19), 3341-3352.
- Geron, C., A. Guenther, J. Greenberg, T. Karl, and R. Rasmussen, 2006: Biogenic volatile organic compound emissions from desert vegetation of the southwestern US. *Atmospheric Environment* **40**(9), 1645-1660.
- Guenther, A., P. Zimmerman, and M. Wildermuth, 1994: Natural volatile organic compound emission rate estimates for US woodland landscapes. *Atmospheric Environment* **28**(6), 1197-1210.
- Guenther, A., C. N. Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, W. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor, and P. Zimmerman, 1995: A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of geophysical research* **100**(D/5), 8873-8892.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer, and C. Geron, 2006: Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics* **6**, 3181-3210.

- Guenther, A. B., X. Jiang, C. L. Heald, T. Sakulyanontvittaya, T. Duhl, L. K. Emmons, X. and Wang, 2012: The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): An extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development* **5**(6), 1471-1492, doi: 10.5194/gmd-5-1471-2012.
- Guenther, A. B., 2012: Upscaling biogenic VOC emissions from leaves to landscapes, in: *Biology, Controls and Models of Tree Volatile Organic Compound Emissions*, edited by: Niinemets, U. and Monson, R., Springer Tree Physiology series.
- Hewitt, C. N., K. Ashworth, A. Boynard, A. Guenther, B. Langford, A. R. MacKenzie, P. K. Misztal, E. Nemitz, S. M. Owen, M. Possell, T. A. M. Pugh, A. C. Ryan, and O. Wild, 2011: Ground-level ozone influenced by circadian control of isoprene emissions. *Nature Geoscience* **4**(10), 671-674. doi:10.1038/ngeo1271.
- Heald, C. L., M. J. Wilkinson, R. K. Monson, C. A. Alo, G. L. Wang, and A. Guenther, 2009: Response of isoprene emission to ambient CO<sub>2</sub> changes and implications for global budgets. *Global Change Biology* **15**(5), 1127-1140.
- Holzinger, R., A. Lee, K. T. Paw, and U. A. H. Goldstein, 2005: Observations of oxidation products above a forest imply biogenic emissions of very reactive compounds. *Atmospheric Chemistry and Physics* **5**(1), 67-75. doi:10.5194/acp-5-67-2005.
- Jang, Y., Y. Eo, M. Jang, J. H. Woo, Y. Kim, J. B. Lee, and J. H. Lim, 2020: Impact of land cover and leaf area index on BVOC emissions over the Korean Peninsula. *Atmosphere* **11**(8), 806.
- Kim, D. S., 2013: Air pollution history, regulatory changes, and remedial measures of the current regulatory regimes in Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **29**(4), 353-368.
- Kim, H.-K., J.-H. Woo, R. S. Park, C. H. Song, J.-H. Kim, S.-J. Ban, and J.-H. Park, 2014: Impacts of different plant functional types on ambient ozone predictions in the Seoul Metropolitan Areas (SMAs), Korea. *Atmospheric Chemistry and Physics* **14**(14), 7461-7484. doi:10.5194/acp-14-7461-2014.
- Kim, J. C., 2001: Development of a Novel Sampling Technique for Natural VOC Emissions. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **17**(E2), 61-70.
- Kim, S. Y., X. Jiang, M. Lee, A. Turnipseed, A. Guenther, J. C. Kim, S. J. Lee, and S. Kim, 2013: Impact of biogenic volatile organic compounds on ozone production at the Taehwa Research Forest near Seoul, South Korea. *Atmospheric environment* **70**, 447-453.
- Klinger, L. F., Q.-J. Li, A. Guenther, J. Greenberg, B. Baker, and J. Bai, 2002: Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China. *Journal of Geophysical Research* **107**(D21), ACH-16. doi:10.1029/2001JD001076.
- Koo, Y. C., 1979: The past, present, and future of environmental laws in Korea. *Paper Collection of Kyung Hee University* **7**, 29-54.
- Laffineur, Q., M. Aubinet, N. Schoon, C. Amelynck, J. F. Müller, J. Dewulf, H. Van Langenhove, K. Steppe, M. Šimpraga, and B. Heinesch, 2011: Isoprene and monoterpene emissions from a mixed temperate forest. *Atmospheric Environment* **45**(18), 3157-3168.
- Lathière, J., D. A. Hauglustaine, A. D. Friend, N. De Noblet-Ducoudré, N. Viovy, and G. A. Folberth, 2006: Impact of climate variability and land use changes on global biogenic volatile organic compound emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics* **6**(8), 2129-2146. doi: 10.5194/acp-6-2129-2006.
- Lee, K. H., H. C. Kim, and C. G. Hu, 2014: A Study on the estimation of BVOCs emission in Jeju Island (1). *Journal of Environmental Science International* **23**(12), 2057-2069.
- Li, M., X. Huang, J. Li, and Y. Song, 2012: Estimation of biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from the terrestrial ecosystem in China using real-time remote sensing data. *Atmospheric Chemistry Physics Discussions* **12**(3), 6551-6592. doi: 10.5194/acpd-12-6551-2012.
- Messina, P., J. Lathière, K. Sindelarova, N. Vuichard, C. Granier, J. Ghattas, A. Cozic, and D. A. Hauglustaine, 2016: Global biogenic volatile organic compound emissions in the ORCHIDEE and MEGAN models and sensitivity to key parameters. *Atmospheric Chemistry and Physics* **16**(22), 14169-14202.
- Müller, J.-F., T. Stavrou, S. Wallens, I. De Smedt, M. Van Roozendaal, M. J. Potosnak, J. Rinne, B. Munger, A. Goldstein, and A. B. Guenther, 2008: Global isoprene emissions estimated using MEGAN, ECMWF analyses and a detailed canopy environment model. *Atmospheric Chemistry Physics* **8**, 1329-1341. doi: 10.5194/acp-8-1329-2008.
- M. Zhang, C. Zhao, Y. Yang, Q. Du, Y. Shen, S.

- Lin, D. Gu, W. Su and C. Liu., 2021: Modeling sensitivities of BVOCs to different versions of MEGAN emission schemes in WRF-Chem (v3.6) and its impacts over eastern China. *Geoscientific Model Development* **14**(10), 6155-6175. doi:10.5194/gmd-14-6155-2021.
- Naik, V., C. Delire, and D. J. Wuebbles, 2004: Sensitivity of global biogenic isoprenoid emissions to climate variability and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Journal of Geophysical Research* **109**(D6), D06301. doi: 10.1029/2003JD004236.
- Niinemets, Ü., U. Kuhn, P. C. Harley, M. Staudt, A. Arneth, A. Cescatti, P. Ciccioli, L. Copolovici, C. Geron, A. Guenther, J. Kesselmeier, M. T. Ler dau, R. K. Monson, and J. Peñuelas, 2011: Estimations of isoprenoid emission capacity from enclosure studies: Measurements, data processing, quality and standardized measurement protocols. *Biogeosciences* **8**, 2209-2246. doi:10.5194/bg-8-2209-2011.
- Oderbolz, D. C., S. Aksoyoglu, J. Keller, I. Barm padimos, R. Steinbrecher, C. A. Skjøth, C. Plaß-Dülmer, and A. S. H. Prévôt, 2013: A comprehensive emission inventory of biogenic volatile organic compounds in Europe: Improved seasonality and land-cover. *Atmospheric Chemistry Physics* **13**(4), 1689-1712. doi:10.5194/acp-13-1689-2013.
- Oleson, K. W., D. M. Lawrence, B. Gordon, M. G. Flanner, E. Kluzek, J. Peter, S. Levis, S. C. Swenson, E. Thornton, J. Feddes, C. L. Heald, J.-F. Lamarque, G. Y. Niu, T. Qian, S. Running, K. Sakaguchi, L. Yang, X. Zeng, X. Zeng, and M. Decker 2010: Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 257pp.
- Pacifico, F., S. P. Harrison, C. D. Jones, A. Arneth, S. Sitch, G. P. Weedon, M. P. Barkley, P. I. Palmer, D. Serça, M. Potosnak, T.-M. Fu, A. Goldstein, J. Bai, and G. Schurgers, 2011: Evaluation of a photosynthesis -based biogenic isoprene emission scheme in JULES and simulation of isoprene emissions under present day climate conditions. *Atmospheric Chemistry Physics* **11**(9), 4371-4389, doi:10.5194/acp-11-4371-2011.
- Pierce, T. E., and P. S. Waldruff, 1991: PC-BEIS: a personal computer version of the biogenic emissions inventory system. *Journal of the Air & Waste Management Association* **41**(7), 937-941.
- Pierce, T., C. Geron, L. Bender, R. Dennis, G. Tonnesen, and A. Guenther, 1998: Influence of increased isoprene emissions on regional ozone modeling. *Journal of Geophysical Research* **103**(D19) 25611-25629.
- Pouliot, G., and T. E. Pierce, 2009: Integration of the Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN) into the CMAQ Modeling System. In 18th International Emission Inventory Conference, Baltimore, Maryland, 14-17.
- Rasmussen, R. A., and F. W. Went, 1965: Volatile organic material of plant origin in the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **53**(1), 215.
- Reisner, J., R. J. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using MM5 mesoscale model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **124**(548), 1071-1107.
- Saito, T., Y. Yokouchi, Y. Kosugi, M. Tani, E. Philip, and T. Okuda, 2008: Methyl chloride and isoprene emissions from tropical rain forest in Southeast Asia. *Geophysical Research Letters* **35**(19), L19812. doi: 10.1029/2008 GL035241.
- Sindelarova, K., C. Granier, I. Bouarar, A. Guenther, S. Tilmes, T. Stavrou, J.-F. Müller, U. Kuhn, P. Stefani, and W. Knorr, 2014: Global dataset of biogenic VOC emissions calculated by the MEGAN model over the last 30 years. *Atmospheric Chemistry Physics* **14**(17), 10725-10788. doi: 10.5194/acpd-14-10725-2014
- Tanaka, K., H.-J. Kim, K. Saito, H. G. Takahashi, M. Watanabe, T. Yokohata, M. Kimoto, K. Takata, and T. Yasunari, 2012: How have both cultivation and warming influenced annual global isoprene and monoterpene emissions since the preindustrial era?. *Atmospheric Chemistry Physics* **12**(20), 9703-9718, doi: 10.5194/acp-12-9703-2012.
- Tingey, D. T., M. Manning, L. C. Grothaus, and W. F. Burns, 1979: The influence of light and temperature on isoprene emission rates from live oak. *Physiologia Plantarum* **47**(2), 112-118.
- Tingey, D. T., M. Manning, L. C. Grothaus, and W. F. Burns, 1980: Influence of light and temperature on monoterpene emission rates from slash pine. *Plant Physiology* **65**(5), 797-801.
- Van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, P. S. Kasibhatla, D. C. Morton, R. S. DeFries, Y. Jin, and T. T. van Leeuwen, 2010: Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). *Atmospheric Chemistry Physics*



- 10**(23), 11707-11735. doi:10.5194/acp-10-11707-2010.
- Wilkinson, M. J., R. K. Monson, N. Trahan, S. Lee, E. Brown, R. B. Jackson, H. W. Polley, P. A. Fay, and R. Fall, 2009: Leaf isoprene emission rate as a function of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Global Change Biology* **15**(5), 1189-1200.
- Korea Forest Service, 2020: Statistical Yearbook of Forestry. : GPRN 11-1400000-000001-10, 449pp.
- KOSTAT, 2020: Agricultural Area Survey. GPRN 11-1240000-000540-10, 113pp.
- MOE, 1992: 1991 White Paper of Environment.
- NIER, 2011: Development of the Asia Emission Inventory in Support of Integrated Modeling of Climate and Air Quality(I), 414pp.
- NIER, 2020: Annual Report of Air Quality in Korea. GPRN 11-1480528-001980-10, 384pp.