

남한지역 자연 배출량 산정 및 대기질 모사를 이용한 평가 Estimation of Biogenic Emissions over South Korea and Its Evaluation Using Air Quality Simulations

김순태 · 문난경^{1),*} · 조규탁²⁾ · 변대원 · 송은영
휴스턴대학교 대기질연구소, ¹⁾한국환경정책평가연구원, ²⁾한국환경기술진흥원
(2008년 3월 21일 접수, 2008년 8월 12일 채택)

Soontae Kim, Nankyung Moon^{1),*}, Kyu-Tak Cho²⁾,
Daewon W. Byun and Eunyoung Song
Institute for Multi-dimensional Air Quality Studies, University of Houston, Houston, TX, USA
¹⁾*Korea Environment Institute, Seoul, Korea*
²⁾*Korea Institute of Environmental Science and Technology, Seoul, Korea*
(Received 21 March 2008, accepted 12 August 2008)

Abstract

BEIS2 (Biogenic Emissions Inventory System version 2) and BEIS3.12 (BEIS version 3.12) were used to estimate hourly biogenic emissions over South Korea using a set of vegetation and meteorological data simulated with the MM5 (Mesoscale Model version 5). Two biogenic emission models utilized different emission factors and showed different responses to solar radiations, resulting in about 10~20% difference in the nationwide isoprene emission estimates. Among the 11-vegetation classes, it was found that mixed forest and deciduous forest are the most important vegetation classes producing isoprene emissions over South Korea comprising ~90% of the total. The simulated isoprene concentrations over Seoul metropolitan area show that diurnal and daily variations match relatively well with the PAMS (Photochemical Air Monitoring Station) measurements during the period of June 3~June 10, 2004. Compared to BEIS2, BEIS3.12 yielded ~35% higher isoprene concentrations during daytime and presented better matches to the high peaks observed over the Seoul area. This study showed that the importance of vegetation data and emission factors to estimate biogenic emissions. Thus, it is expected to improve domestic vegetation categories and emission factors in order to better represent biogenic emissions over South Korea.

Key words : Biogenic emissions, Isoprene, Vegetation data, Air quality, BEIS

1. 서 론

인위적인 오염원과 더불어 산림 및 농경지 등에서 발생하는 자연 배출 대기오염물질은 이송 과정 중

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-380-7607, E-mail : nkmoon@kei.re.kr

광화학 반응을 통해 배출원 및 그 풍하 지역의 오염물질 농도에 영향을 미친다 (Guenther *et al.*, 2000; Fehsenfeld *et al.*, 1992). 특히 아이소프렌 (Isoprene)과 모노터펜 (Monoterpenes)과 같이 자연적으로 발생하는 휘발성 유기물질은 오존 및 2차 유기 에어로솔 (secondary organic aerosol) 형성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다 (Tsigaridis and Kanakidou, 2007; Morris *et al.*, 2006; Pierce *et al.*, 1998). 국내의 경우 전 국토면적의 60% 이상이 산림 지역으로 자연 오염원에서 발생하는 휘발성 유기물질의 총량은 그 인위적인 배출량과 유사한 수준으로 산출되고 있으며 (조규탁 등, 2006), 대기질에 미치는 자연 배출물질의 영향을 정량적으로 파악하기 위해서는 그 배출량에 대한 정확한 평가가 요구되고 있다.

현재 북미 지역에서는 자연 오염원에서 배출되는 오염물질이 대기 중에 미치는 영향을 평가하기 위하여 BEIS (Biogenic Emissions Inventory System)와 GLOBEIS (Global Biosphere Emissions and Interactions System) 등이 이용되고 있다. 이들 모델은 기온, 일사량 등 기상자료와 함께 대상지역의 식생자료를 이용하여 격자별로 발생하는 자연오염물질의 배출량을 산정하며 (Yarwood *et al.*, 2002; Geron *et al.*, 1994), 보다 정확한 자연 배출량 산정을 위해서는 입력자료에 대한 정량, 정성적인 분석이 요구된다 (Hanna and Wilkinson, 2004).

입력되는 식생자료는 해당지역의 격자별 식생 분포 특성과 식생별 오염물질의 배출계수를 필요로 한다. 미국 환경청의 경우 전미 지역을 1-km 격자로 세분하여 자연 배출량을 산정할 수 있도록 230가지의 식생별 분포 자료와 배출계수를 공개하고 있다. 또한, 특정 지역에 대한 식생자료를 수정, 보완하기 위하여 직접적으로 산림에 대한 조사와 함께 위성자료를 이용한 연구 등도 수행되고 있다 (e.g., Byun *et al.*, 2005; Vizuete *et al.*, 2002; Wiedinmyer *et al.*, 2001).

국내 연구의 경우 소나무와 참나무 등 국내 수종에서 배출되는 아이소프렌과 모노터펜에 대해 계절별 배출 특성을 파악하기 위한 연구가 수행된 바 있다 (손윤석 등, 2006; 김초전 등, 2004a, b). 직접적인 자연배출량 산정과 관련하여 김태우와 이종범 (1996)은 환경부에서 발행한 녹지 자연도를 이용하여 BEIS를 통해 기온과 운량에 따른 수도권 지역의 자연 배출량의 변화를 살펴 보았으며, 조규탁 등 (2006)은 임

업연구원에서 구축한 수치 임상도를 이용하여 식생 분포를 조사하고, 표준기상조건 (30°C, 1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)에서 BEIS2 (BEIS Version 2)와 CORINAIR를 이용하여 지역별, 월별 자연 배출량을 산출한 바 있다. 또한, 문윤섭과 구윤서 (2006)는 토지피복지도를 이용하여 GLOBEIS를 통해 2004년 8월 중 배출량을 산정하고, 국립환경과학원에서 산정한 월별 자연 배출량과 비교하였다. 이러한 기존 연구에서는 BEIS2를 이용하여 자연 배출량을 산출하였으나, 자연 배출량이 대기질에 미치는 영향 및 그 산정 방법에 대한 평가는 아직까지 많은 연구가 수행되지 못하고 있는 실정이다. 또한, BEIS2 외에 보다 수정 보완되고 보편적으로 많이 이용되고 있는 상위 버전의 BEIS (e.g., BEIS Version 3.12)를 이용한 국내 자연배출량 산정 및 그 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 국내 식생분포 자료 (i.e., 조규탁 등, 2006)를 이용하여 BEIS2와 BEIS3.12를 통해 자연 배출량을 산정하고 그 결과를 수도권 지역의 대기질 모사에 이용하여 예측된 아이소프렌 농도를 측정 자료와 비교하여, 산정된 국내 자연 배출량과 이용된 입력자료에 대해 평가하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 식생자료 및 배출계수

식생자료는 자연 배출량을 산정하기 위한 중요한 입력자료로서, 식생구분과 엽생체량에 따라 아이소프렌이나 모노터펜과 같은 자연적으로 발생하는 휘발성 유기물질의 배출량이 결정되어진다. 조규탁 등 (2006)은 전국의 자연 배출량을 산정하기 위하여 임업연구원에서 구축한 수치임상도를 활용하였는데, 수치임상도는 산림자원연구에서 이용해 왔던 종이형태 지도를 임업연구원에서 디지털 지도로 구축한 자료이다. 수치임상도에는 임상 (식생종류별 면적), 경 (홍고직경), 령 (수령), 밀도 (수관면적비율) 등의 4가지 정보가 제공되고 있다. 수치임상도에서 제공하는 식생종류는 나대지 등 비식생 구분을 제외하면 16종인데, 자연림과 인공조성림은 동일한 식생이므로 실제 식생의 종류는 더 단순해진다. 표 1에 본 연구에서 이용된 식생의 종류를 보였으며, 물을 제외할 경우 11종으로 구분된다. 수치임상도의 식생종류별 배출계수

Table 1. Comparisons of isoprene emission factor and leaf area index for each vegetation between BEIS2 and BEIS3.12 used in this study.

Korea code	Description	BEIS2			BEIS3.12		
		Mapping species	Isoprene (gC/km ² /hr)	LAI	Mapping species	Isoprene (gC/km ² /hr)	LAI
C	Conifer forest	Coniferous	745.4	9	USGS coniferous forest ¹⁾	11383	6
CA	Chestnut	Castanea	42.5	5	Castanea	38	5
D	Pine	Pinus	79.3	3	Pine red	70	3
H	Deciduous forest	Deciduous	2112.4	6	USGS deciduous forest ¹⁾	8232	5
LP	Pasture	Pasture	56.2	0	Pasture	49	0
M	Mixed forest	Northern mixed	10150	5	USGS mixed forest ¹⁾	7729	5
O	Oak	Quercus	36063	5	Oak chestnut	26250	5
K	Korean white pine	Pinus	79.3	3	Pine Sw white	70	3
PL	Larch	Larix	42.5	5	Larch	38	5
PR	Pitch pine	Pinus	79.3	3	Pine pitch	70	3
R	Rice	Rice	102	0	Rice	90	0
Water	Water	Water	0	0	Water	0	0

Note: ¹⁾ Isoprene emission factors for the species are not adjusted to that for the USGS shrub land in this study.

와 엽생체량은 기존의 국내 연구자료와 함께 BEIS2에 제시된 값을 이용하였다.

본 연구에서는 조규탁 등(2006)이 이용한 동일한 식생자료와 배출계수를 바탕으로 BEIS2를 적용하여 자연 배출량을 산정하고자 하였으며, 이와는 별도로 BEIS3.12를 이용할 때에는 표 1에 제시된 바와 같이 국내 식생구분을 BEIS3.12에 나타난 식생과 연관지어서(mapping) 자연 배출량을 산정하였다. BEIS2와 BEIS3.12의 배출계수를 동일하게 이용할 수도 있으나, 본 연구에서는 이용되는 식생자료별 배출계수의 불확실성을 고려하여 서로 다른 배출계수를 두 모델에서 이용하고 이를 평가하고자 하였다.

표 1에는 자연 배출 휘발성 유기물질 중 가장 중요한 아이소프렌의 배출계수를 BEIS2와 BEIS3.12에 대해 비교하였다. BEIS2에 비해 BEIS3.12를 이용할 경우 침엽수림(C)과 활엽수림(H)에 대해 아이소프렌의 배출계수는 각각 15배, 4배 가량 높게 나타났다. 참나무 수종(Q)의 경우 25% 가량 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 혼합림(M)의 경우 BEIS2에 비해 BEIS3.12의 아이소프렌 배출계수가 20% 가량 낮아 지는 것을 볼 수 있다. BEIS2에 기본적으로 제시된 배출계수와 조규탁 등(2006)이 이용한 배출계

수를 비교해 보면 참나무 수종에서 차이를 보이며, BEIS2의 기본 아이소프렌 배출계수는 29,750 gC/km²/hr이고 조규탁 등(2006)이 할당한 배출계수는 36,063 gC/km²/hr로 BEIS2보다 20% 정도 큰 값으로 나타났다. 표 1에서 보인 바와 같이 BEIS3.12의 아이소프렌 배출계수 중 USGS (United States Geological Survey) 자료에 따른 식생구분의 경우(C, H 그리고 M), 해당 배출계수를 이용한 아이소프렌 배출량을 북미 지역에 대한 기존 자료(e.g., Guenther *et al.*, 1995)와 비교하면 상대적으로 너무 많은 양이 산정되어 있다. 따라서 이를 보완하기 위하여 BEIS 3.12에서는 이들 식생에 대한 아이소프렌의 배출계수를 관목림(shrub land)의 배출계수로 대체하여 산정하도록 수정되어 있다(Pierce, 2001). 본 연구에서는 국내 식생구분 중 혼합림이 차지하는 중요도와 BEIS2에서 이용된 배출계수와 유사한 수준으로 자연 배출량을 산정하기 위하여 위와 같은 USGS 식생구분에 따른 배출계수 보정을 따르지 않도록 BEIS3.12를 수정하여 이용하였다. BEIS3.12의 관목림에 대한 아이소프렌의 기본 배출계수는 600 gC/km²/hr으로 이를 이용할 경우 BEIS3.12를 통해 산정된 국내 전체 아이소프렌 배출량은 BEIS2에 비

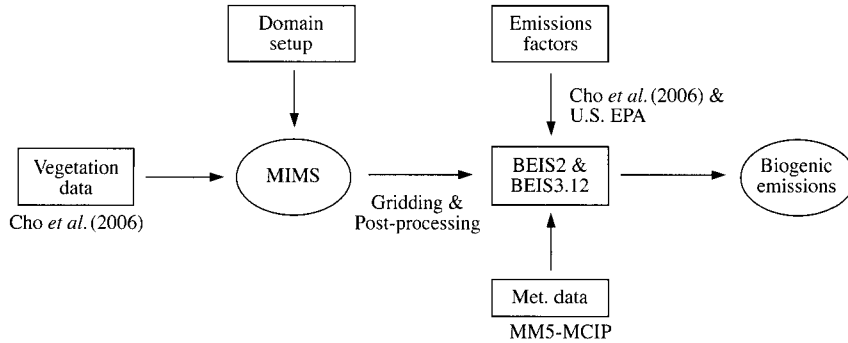


Fig. 1. Estimation of biogenic emissions using BEIS with input data used in this study.

해 절반 가량으로 낮아지는 것으로 조사되었다.

2. 2 기상자료

대기질 모사를 위해서는 표준 상태 배출량이 아닌 기상변화에 따른 자연 배출량이 필요하며, 시간별 기상변화에 따른 자연 배출량 산정을 위해서는 기온, 일사량 등 기상자료가 매 시간별로 입력되어야 한다. 본 연구에서는 NCAR/Penn State (National Center for Atmospheric Research/the Pennsylvania State University) Mesoscale Model, Version 5, Release 3.6 (MM5 V3.6) (Grell *et al.*, 1994)를 이용하여 기상장을 작성하였다. 기상 모사를 위해 27-, 9-, 그리고 3-km 격자로 네스팅(nesting)하였으며, 27-km (109 × 109) 모사 영역은 한반도 및 동아시아 지역을 포함하며, 9-km (82 × 82)는 남한 전체 및 북한 일부, 그리고 3-km (70 × 70) 영역은 서울 및 수도권 지역을 포함한다(그림 2). 수직으로는 43개의 연직층을 이용하였으며, 최하층의 높이는 33 미터이다. 초기조건으로 NCEP/NCAR CDAS Reanalysis 자료를 이용하였으며, 모사 시 a) Grell cumulus, b) MRF PBL, c) five-layer soil scheme 등이 이용되었다.

자연 배출량 산정을 위한 기상자료는 MM5 모사 결과를 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)에 적용하여 10 m에서의 기온 및 지표면 일사량, 기압 등의 자료를 준비하였으며, 대기질 모사를 위한 CMAQ (Community Multiscale Air Quality) (Byun and Schere, 2006; Byun and Ching, 1999) 모사에도 이용하였다.

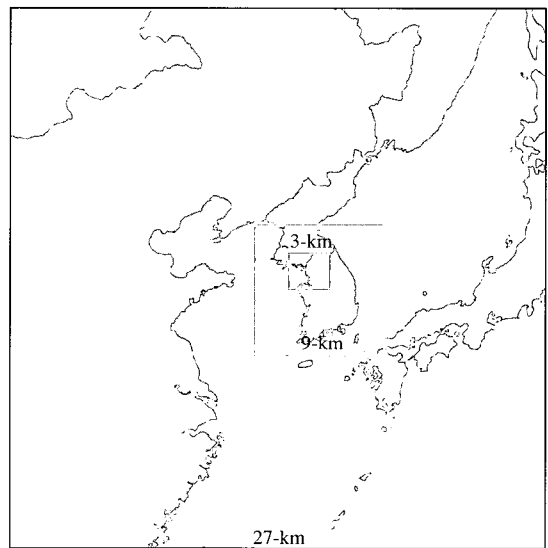


Fig. 2. Modeling domains used in this study.

2. 3 자연 배출량 산정방법

BEIS를 이용한 자연 배출량은 대상영역 안에 일정 간격으로 설정된 격자별로 산정되며, 이를 위해선 매 격자별로 각 식생의 분포가 준비되어야 한다. 그림 1은 자연 배출량 산정 방법을 보이기 위한 것이며, 우선적으로 Geographic Information System (GIS) shape 파일 형식의 식생자료는 Multi-scale Integrated Modeling System (MIMS, <http://www.ie.unc.edu/cempd/projects/mims/spatial>) spatial allocator를 이용하여 각 격자별로 존재하는 식생 종류와 분포 밀도를 산출한 후, 전처리를 통하여 BEIS의 입력자료로 변환하였다.

BEIS를 통한 자연 배출량 산정 시 이용한 식생별 배출계수는 앞 절에서 설명하였으며 입력된 식생 분포와 배출계수를 바탕으로 BEIS에서는 표준 상태 (기온 30°C, 일사량 1,000 μmol/m²/sec)에서의 배출량을 산정하게 된다. 이 표준상태 배출량은 기상자료를 이용한 보정 작업을 통해 매시간 배출량으로 산출되며, 본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 MM5-MCIP을 이용하여 매 시간별 기상자료를 준비하였다.

2.4 대기질 모사

대기질 모사를 이용하여 가장 대표적 자연 배출물질인 아이소프렌의 농도를 예측하고 측정 자료와 비교하여 본 연구에서 산정된 자연 배출량에 대한 정량적인 평가를 하고자 하였다. 대기질 모사를 위한 인위적인 배출량은 남한 지역의 경우 국립환경과학원의 2004년 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 자료를, 그 외 지역에 대해서는 ACE-ASIA 자료를 이용하였다. 상기 CAPSS 배출량 자료는 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel for Emissions; Coats, 1996; Benjey *et al.*, 2001)를 이용하여 모델 입력자료로 준비하였다. 모사기간은 2004년 6월 1일에서 10일까지이며, 초기조건은 처음 이틀간을 spin-up하였다. 대기질 모사는 CMAQ version 4.5.1를 이용하였으며, 모사 영역은 기상장과 마찬가지로 27-, 9-, 그리고 3-km로 설정하였다. 화학 메카니즘은 Carbon Bond 4 (CB4, Gery *et al.*, 1989)를 이용하였으며, 경계조건은 27-km 모사의 경우 CMAQ 초기 (default) profile 자료를 이용하였으며, 9-km와 3-km 모사는 상위 모사영역의 결과를 이용하였다. 수직으로는 23개의 연직층을 이용하였으며 지표에서 지상 1-km 높이까지는 MM5의 수직층 구조를 적용하고, 그 이상에서는 MM5의 2~3개 층을 한 층으로 합쳐 (collapsing) 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표준상태 배출량

본 연구에서 이용된 식생자료의 총 면적은 59,749 km²로, 휴전선 인근 등 일부 지역에서는 자료가 준비되지 않아 이용할 수 없었으며, 남한 총 면적은

99,000 km²로 볼 때 산림 등 자연 배출 지역은 전국토의 60% 정도에 해당한다. 전 남한 지역에 대해 식생별 분포를 살펴보면 혼합림 (M)과 소나무림 (D)이 각각 전 산림 면적의 27% 정도를 차지하였으며, 그 다음으로는 활엽수림 (H) 25%, 낙엽송 (PR) 8% 순이었다 (그림 3). 이러한 식생 구분을 바탕으로 표 1에 제시된 배출계수를 이용하여 표준 상태 (30°C, 1,000 μmol/m²/sec)에서의 아이소프렌 배출량을 산정하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 침엽수림은 차지하는 면적에 비해 아이소프렌 배출계수가 낮아 전체적인 아이소프렌의 배출량은 혼합림과 활엽수림에 비해 현저히 낮게 나타났다. BEIS2를 이용할 경우 예상되는 아이소프렌의 총 배출량은 혼합림 (M)이 78%, 활엽수림 (H) 15%, 그리고 참나무 (O)가 6%를 차지하는 것으로 산정되었다. 이에 반해 BEIS 3.12의 경우 아이소프렌의 전체 배출량은 혼합림

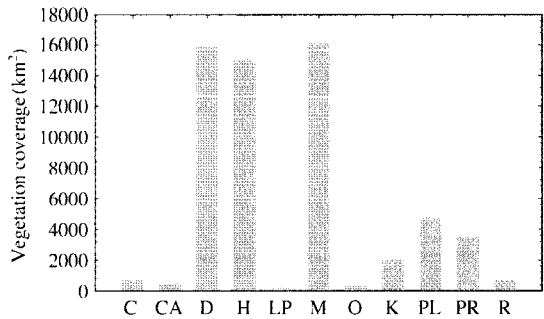


Fig. 3. Coverage of each vegetation type over South Korea based on the vegetation data used in this study.

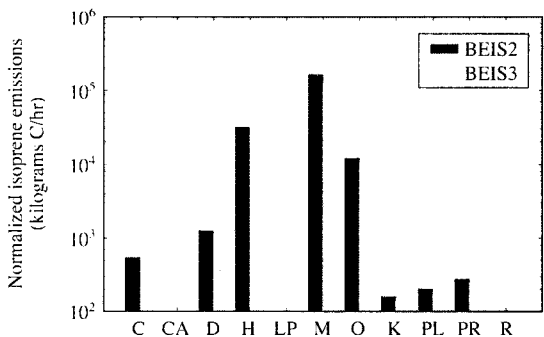


Fig. 4. Normalized isoprene emissions for each vegetation type over South Korea.

47%, 활엽수림 46%, 그리고 침엽수림과 참나무가 각각 3% 가량 차지하는 것으로 조사되었다. 표준상태에서의 배출량을 볼 때 국내 자연 배출량 중 혼합림과 활엽수림이 차지하는 비율이 매우 높게 나타났으며, 활엽수림에 대해 적용된 배출 계수의 차이로 인하여 표준 상태 아이소프렌 배출량은 BEIS3.12가 BEIS2에 비해 20% 정도 많게 산정되었다.

그림 5는 혼합림과 활엽수림의 분포를 각각 나타낸 것으로 지리정보(GIS) 자료의 픽셀(pixel) 해상도는 약 30 m이다. 혼합림은 충북과 경남북, 그리고 강원 남부 지역에서 매우 높게 나타나며, 이에 반해 활엽수림은 서울 남동쪽의 경기, 강원 북부, 충청 일부 지역에서 높게 나타났다. 이러한 식생분포의 지역적 변화는 자연 배출량 산정에 이용되는 배출계수에 따라 해당 지역에 대해 산정되는 자연 배출량이 달라지는 요인으로 작용할 것으로 사료된다. 예를 들어 서울 남동 방향의 수도권 지역의 경우 활엽수림의 높은 분포로 인해 표 1에 제시된 BEIS3.12의 배출 계수를 이용할 경우 BEIS2의 산정에 비해 표준상태 아이소프렌 배출량이 높게 나타날 것으로 예상되며, 이와 반대로 부산권의 경우 혼합림의 분포도가 높아 BEIS2의 배출계수를 이용할 경우 BEIS3.12에 비해

많은 아이소프렌 배출량이 산정될 것으로 예상된다.

3.2 기상에 따른 시간별 자연 배출량

표준상태에서 산정된 아이소프렌 배출량은 기온과 일사량 등 기상 자료를 이용하여 아래 식(1)과 같이 보정되며(Geron *et al.*, 1994), 이에 따라 식생 분포, 배출 계수와 같은 식생자료뿐만 아니라 입력되는 기상 자료에 의해 실제적으로 산출되는 자연 배출량이 달라지게 된다(Hanna and Wilkinson, 2004).

$$I = I_s \cdot C_L \cdot C_T \tag{1}$$

여기에서 I는 기온과 PAR (Photosynthetically Active Radiation) 등에 따라 산정되는 아이소프렌 배출량이며, I_s 는 표준 상태 배출량, C_L 과 C_T 는 각각 일사량과 기온에 따른 보정계수이다. 실제적으로 기온에 대한 보정계수는 BEIS2와 BEIS3.12에서 동일하게 적용되는 반면, 일사량에 대한 보정계수 산출은 약간 다르게 이루어진다. 예를 들어, BEIS2에서는 소나무, 활엽수, 침엽수 등 식생별로 구분하여 일사량 보정값을 산출하며, 높이에 따른 엽생체량 변화를 고려하기 위하여 canopy를 5층으로 구별하는 반면, BEIS3.12에서는 단층으로 그 보정계수를 산출하며, 식생구분을

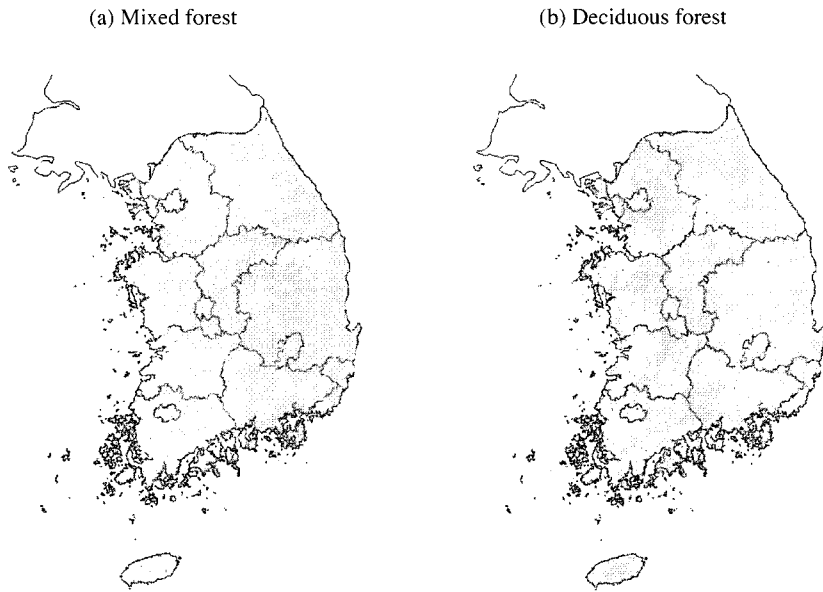


Fig. 5. Spatial distributions of (a) mixed forest and (b) deciduous forest over South Korea. Darker color represents more coverage by the forest.

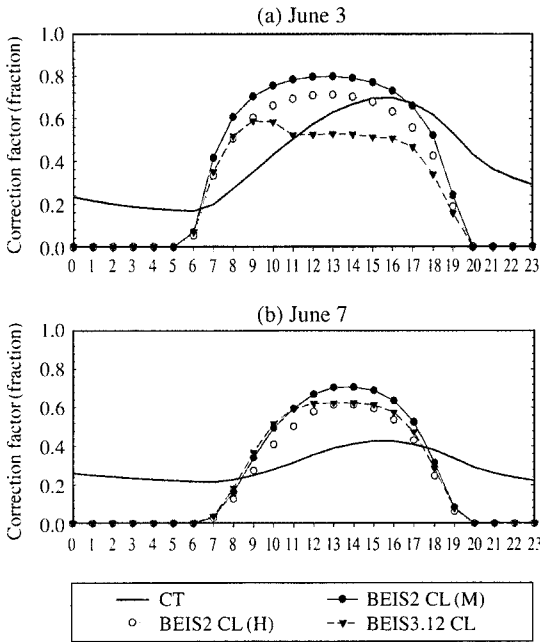


Fig. 6. Diurnal variations of temperature and light correction factors for (a) June 3rd and (b) June 7th, 2004 estimated with MM5-MCIP data over South Korea. Solid line represents temperature correction factors (CT). Light correction factors for mixed forest (M) and deciduous forest (H) in BEIS2 are shown with filled and open circles respectively. Downward triangles are light correction factors for BEIS 3.12.

하지않고 모든 식생에 대해 동일한 보정값을 적용하며, PAR의 산출 방식도 direct beam과 diffuse beam으로 구분하여 산출하는 등 BEIS2에 비해 수정된 방식을 이용하고 있다.

그림 6은 6월 3일과 7일에 대해 BEIS2와 BEIS 3.12에서 산정된 기온 및 일사량 보정값의 일변화를 보인 것으로 BEIS2의 경우 국내 산림에서 중요한 혼합림 (M)과 활엽수림 (H)를 구분하였으나, BEIS 3.12는 식생별 구분을 하지 않으므로 하나의 값으로 제시하였다. 6월 3일은 대체로 맑은 날로 BEIS3.12에 비해 BEIS2의 일사량 보정값이 30~40% 이상 크게 나타났으며, 특히 혼합림의 일사량 보정값이 높은 것을 볼 수 있다. 6월 7일은 대체로 구름이 많이 끼인 날로 맑은 날과 달리 BEIS2와 BEIS3.12의 일사량 보정값이 낮 시간 동안 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 기온 보정값은 대체로 늦은 오후에 최고

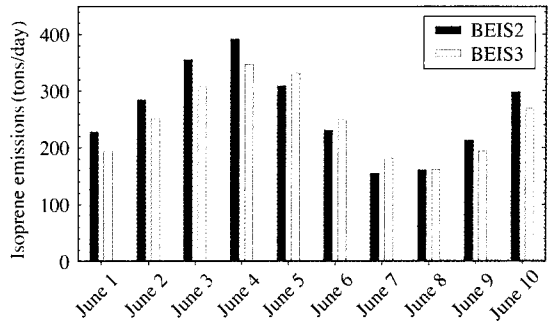


Fig. 7. Comparisons of daily isoprene emissions estimated with BEIS2 and BEIS3.12 over South Korea.

값을 보였으며 맑은 날과 흐린 날의 기온 차이에 대한 변화를 보이고 있다.

그림 7은 2004년 6월 1일부터 10일까지 일별 아이소프렌 배출량을 나타낸 것이다. 대상기간 동안 남한지역의 전체적인 날씨는 6월 1일~4일까지는 대체로 맑은 날이었으며, 6월 5일 오후부터는 북쪽으로 부터 구름이 끼기 시작하여 6월 8일까지 흐린 날이 이어졌다. BEIS2와 BEIS3.12를 이용하여 산정된 남한지역 전체의 아이소프렌 배출량을 비교해보면 맑은 날(6월 1일~4일)의 경우 대체적으로 BEIS2가 15% 가량 높은 배출량을 보이는 반면, 흐린 날(6월 5일~8일)의 경우 BEIS3.12가 15% 정도 높은 아이소프렌 배출량을 보이고 있다. 이는 그림 4에 나타난 바와 같이 표준 배출량의 경우 BEIS3.12가 BEIS2에 비해 20% 높은 값을 보이나, 맑은 날의 경우 그림 6(a)에 보인 바와 같이 일사량에 대한 보정값이 BEIS2에 비해 낮게 계산되어 실제적인 아이소프렌의 배출량은 BEIS2 보다 10~20% 가량 낮게 나타난다. 모사 기간 동안 맑은 날의 경우 남한지역 전체 아이소프렌 배출량은 200~400 tons/day인 것으로 나타났다. 이에 반하여 흐린 날의 경우 일사량에 대한 보정값은 두 모델에서 유사하게 산정되는 반면(그림 6(b)), 산정된 표준상태 배출량 차이로 인하여 BEIS3.12가 BEIS2에 비해 높은 아이소프렌 배출량을 산출하는 것으로 나타났다.

그림 8은 남한지역에 대한 지역적인 아이소프렌의 배출량 차이를 나타내기 위한 것으로, BEIS2의 경우 충북을 비롯한 내륙지역에서 BEIS3.12에 비해 뚜렷하게 높은 배출량을 보인다. 이는 이 지역에서는 혼

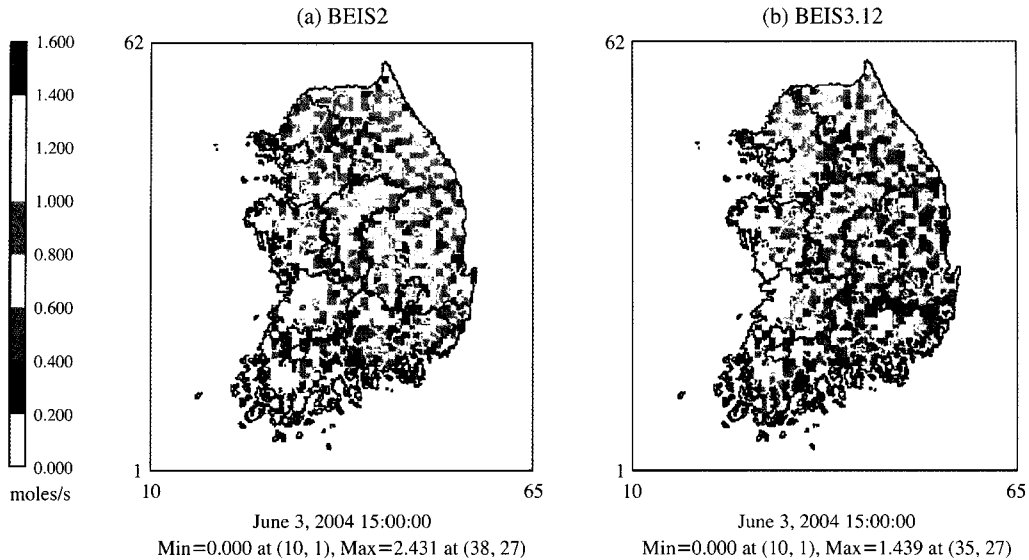


Fig. 8. Snapshots of isoprene emissions estimated with (a) BEIS2 and (b) BEIS3.12 over South Korea for June 3, 2004 at 15 KST.

합림이 주요 식생으로 표준 배출량 산출 시 혼합림에 대한 BEIS2의 배출계수가 크고, 그 시간 일사량에 대한 보정값도 높기 때문인 것으로 사료된다.

아이소프렌 외에 BEIS에서는 모노터펜이나 OVOCs (Other Volatile Organic Compounds)와 같은 자연 배출 휘발성 유기물질을 산정하며, 이렇게 산정된 자연 배출 물질들은 대기질 모사 시 이용되는 화학 메커니즘(chemical mechanism)에 따라 화학종을 구분하게 된다. 그림 9는 BEIS2와 BEIS3.12에 대해, 아이소프렌 외에 CB4에 따라 화학종 구분이 된 자연 배출 휘발성 유기물질의 배출량을 비교한 것으로 OLE (Olefin)은 BEIS2와 BEIS3.12가 큰 차이를 보이지 않는 반면, ALD2 (aldehydes), PAR (Paraffin), TERPB (Terpenes) 등의 배출량은 BEIS2에 의해 높게 산정되는 것으로 나타났다.

BEIS3.12의 경우 이전 버전과는 달리 에틸렌(ETH), 포름알데히드(FORM), 톨루엔(TOL), 자일렌(XYL), 그리고 일산화탄소(CO) 등 추가적인 물질들에 대해 배출량을 산정하게 된다. BEIS3.09 (BEIS version 3.09)의 경우 이런 추가 물질들에 대한 배출량은 산정하지 않으나 BEIS3.12와 비교하여 동일한 아이소프렌 배출량을 산정하고 있다. 본 연구 결과에서 보이지는 않았으나 BEIS3.09와 BEIS3.12를 이용

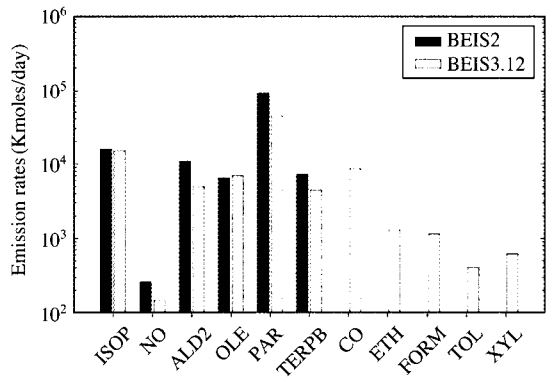


Fig. 9. Comparisons of biogenic emissions estimated with BEIS2 and BEIS3.12 over South Korea during the period of June 1 ~ June 10, 2004.

한 대기질 모사 결과를 비교해 본 결과, 대기중 아이소프렌 농도 차이는 미미하였으며, 대기 중 오존 농도에 미치는 영향에 대한 차이도 대부분의 경우 1 ppb보다 작은 것으로 나타났다.

3.3 대기질 모사를 통한 아이소프렌 배출량 산정 평가

BEIS2와 BEIS3.12를 통해 산정된 아이소프렌의

배출량이 실제 측정치와 어느 정도 부합되고 기상 조건에 따른 일간 변화 등을 알아보기 위하여, 산정된 자연 배출량을 이용하여 대기질 모사를 수행하였으며, 그 결과를 광화학 측정망(PAMS)에서 관측된 아이소프렌 농도와 비교하였다. 모사값과 관측값 간 비교는 수도권 지역을 중심으로 3-km 모사영역에서

이루어졌으며, 서울 및 경기도 전 지역, 그리고 강원도와 충청도 일부를 포함한다. 모사영역은 그림 10에 보인 것처럼 불광, 정동, 심곡, 구월, 양평, 광주, 석모, 포천 등 8곳의 광화학 측정망을 포함하고 있다.

식생 분포는 자연 배출량 산정 시 지역적인 차이를 보이게 하는 주요한 요인으로 수도권 지역의 식생 분포 특성을 파악하기 위하여 그림 11에 제시하였다. 남한 전 지역과 마찬가지로 주요 식생은 활엽수림과 혼합림으로 나타났으며, 특히 휴전선 이남 지역과 서울 남서부 주변으로 높은 밀도의 활엽수림이 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 혼합림은 서울 북부 일부와 경기도와 강원, 충북 경계 부근에 분포하였으며, 분포 밀도 또한 활엽수림에 비해 다소 낮은 것으로 나타났다.

모사 기간(2004년 6월 3일~10일) 동안 기온, 일사량 등 기상 조건 변화를 알아보기 위하여 도심 지역이 아닌 외곽 지역의 강화, 철원, 양평 3곳의 기상대 자료를 이용하였다. 기상조건 또한 자연 배출량 산정 시 이용되는 중요한 입력자료이며 본 연구의 모사기간 동안 이용된 기온 등 기상자료를 그림 12에서 살펴보았다. 6월 3일에서 5일까지 3일간은 낮 시간 동안 30도 전후의 높은 기온을 보인 반면 6월 6일에서 8일까지는 구름 등의 영향으로 낮 최고기온이 25도 정도로 낮아졌으며, 6월 9일 이후에는 다시 기온이 상승하는 것을 볼 수 있다(그림 12). 그림

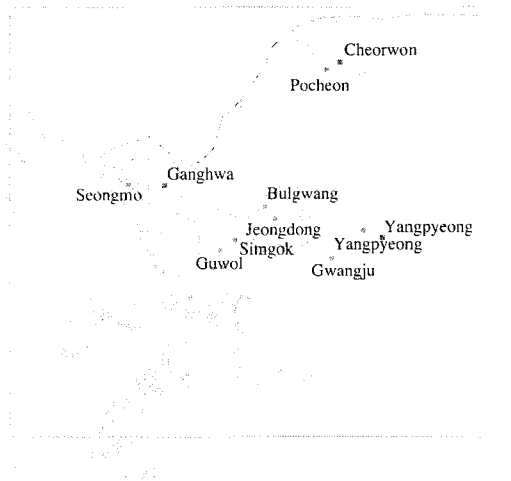


Fig. 10. A 3-km CMAQ domain used to simulate isoprene concentrations and its contributions to ozone. Filled circles and squares represent the PAMS and meteorology observations sites used in this study.

(a) Deciduous forest



(b) Mixed forest

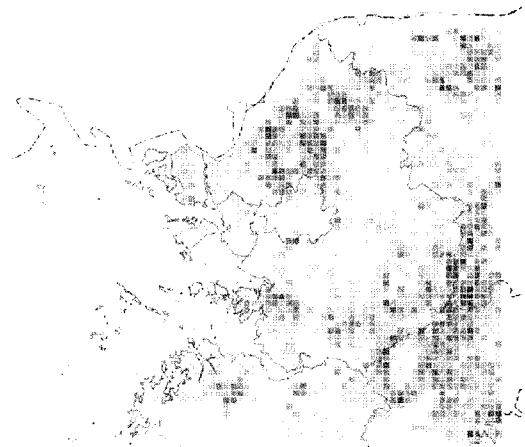


Fig. 11. Spatial distributions of (a) deciduous forest and (b) mixed forest over Seoul metropolitan area.

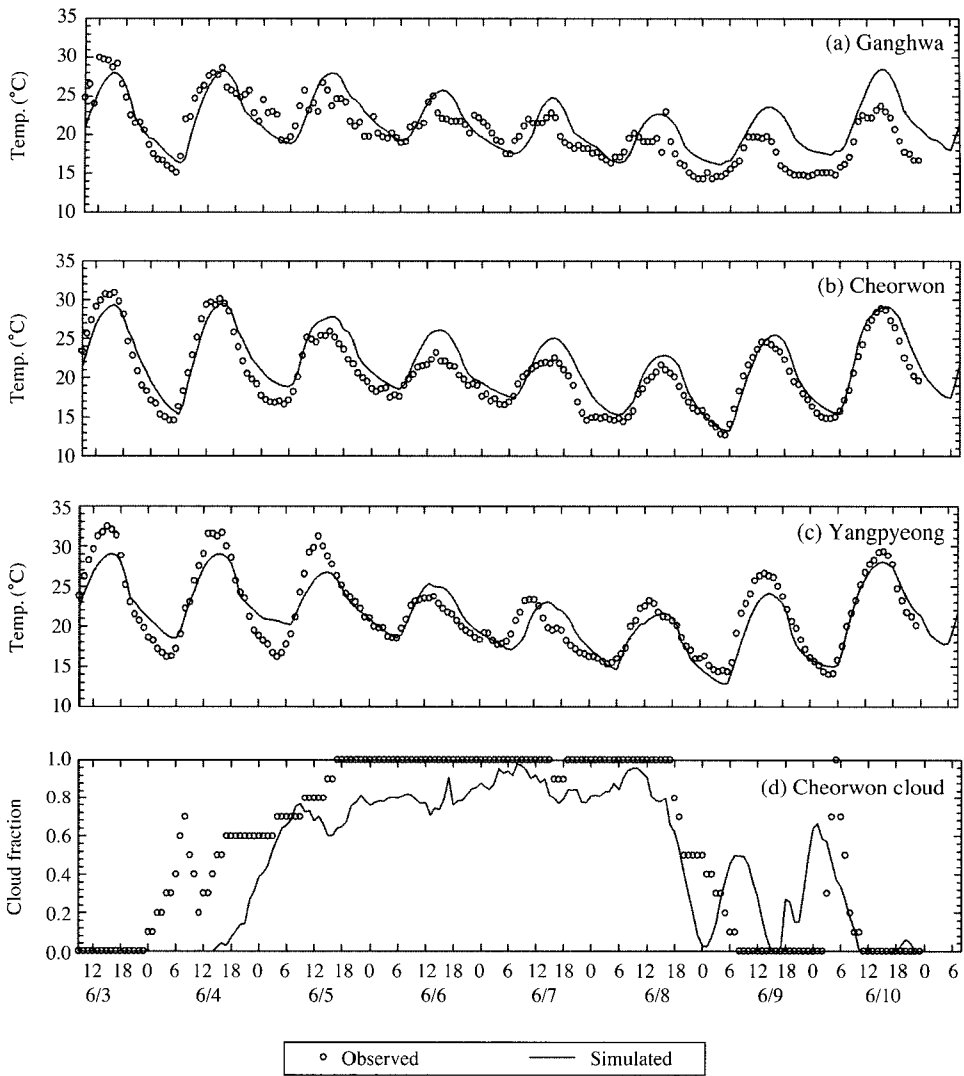


Fig. 12. Comparisons of observed and simulated ambient temperatures at (a) Ganghwa, (b) Cheorwon and (c) Yangpyeong, and (d) cloud fraction at Cheorwon during the period of June 3~10, 2004.

12(d)는 철원지역의 모사된 운량을 측정치와 비교한 것으로 6월 5일부터 8일까지는 구름이 많은 날임을 알 수 있다.

그림 13은 BEIS2와 BEIS3.12를 이용하여 산정된 아이소프렌을 포함한 자연 배출량을 이용한 모사 결과를 보인 것으로 모사된 대기중 아이소프렌의 농도가 식생 분포에 따라 공간분포가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 예를 들어 BEIS2의 경우 그림 11(b)에 보인 것처럼 혼합림의 분포가 높은 지역에

서 아이소프렌이 높은 농도를 보이는 반면, BEIS 3.12의 경우 활엽수림이 많은 지역과 그 풍하 방향에서 아이소프렌 농도가 높게 나타남을 볼 수 있다. 이런 결과를 미루어 볼 때 자연 배출량 산정 시 공간적인 식생 분포 자료와 함께 국내 식생의 배출 특성을 잘 나타낼 수 있는 배출계수의 확보가 중요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서는 그림 13에 보인 것처럼 자연 배출량 산정 시 이용된 식생자료가 남한 지역에만 국한되어 휴전선 인접 지역 및 북한

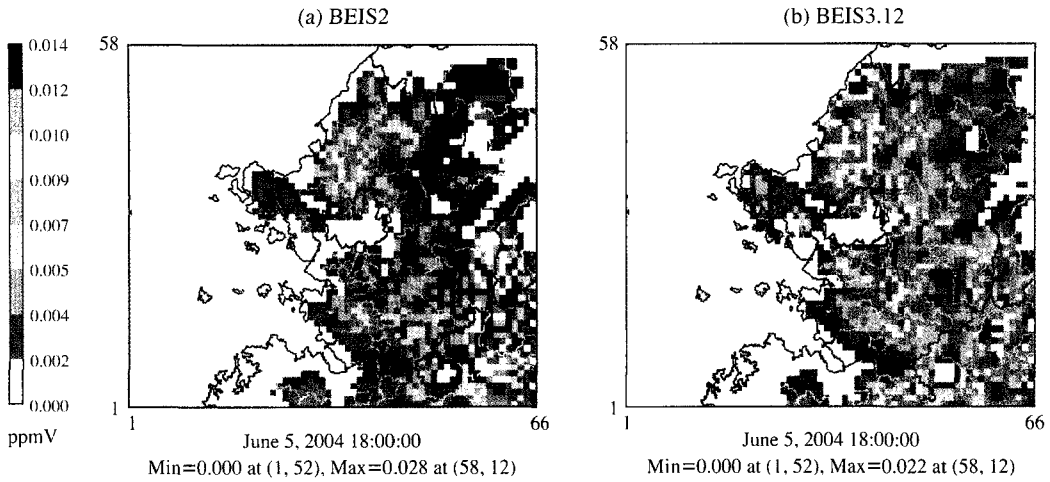


Fig. 13. Snapshots of isoprene concentrations simulated with (a) BEIS2 and (b) BEIS3.12 emissions over Seoul metropolitan area for June 5, 2004 at 18 KST.

지역에 대한 자연 배출량은 산정되지 못하였으며, 수도권 지역의 지리적 위치를 고려할 때 향후 이러한 미비점을 보완할 수 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

모사 농도와 비교를 하기 위해 이용된 8곳의 측정 자료 중 포천, 양평 등 산림 및 외곽 지역에서의 아이소프렌 농도는 낮 시간 동안 4~8 ppb의 최고 농도를 보였으며, 이에 반해 구월, 심곡, 정동 등 도심 지역에서는 대부분 시간 동안 1 ppb 이하의 농도를 보였다(그림 14). 모사된 아이소프렌 농도를 살펴보면 오후 6시 이후의 저녁 시간에 나타나는 몇몇 고농도를 제외하고는 측정치와 잘 부합하는 것으로 나타났다. 구름이 많이 끼인 흐린 날(6월 6일~6월 8일)에 비해 맑은 날의 아이소프렌 농도가 높게 나타나 측정치의 일별 변화와도 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 불광을 제외한 포천, 양평 등 대부분의 측정소에서 BEIS2에 비해 BEIS3.12를 이용한 아이소프렌 모사 농도가 35% 가량 높게 나타났으며(그림 15), 높은 관측농도와도 보다 잘 부합되는 것으로 나타났다. 이는 해당위치와 인접한 산림이 대부분 혼합림으로 BEIS2에 비해 BEIS3.12가 혼합림에 대해 높은 배출계수를 적용하여 아이소프렌 배출량을 높게 산정하기 때문인 것으로 사료된다. 포천과 석모의 경우 모사된 아이소프렌 농도는 측정치와 비교하여 대부분의 낮 시간 동안 낮은 농도를 보이는데, 이는 이들

측정소가 남한의 최북단에 위치해 있어 식생자료가 결여된 지역과 인접해 있고, 모사기간 중 낮 시간 동안 주로 북풍계열의 바람이 우세하였기 때문으로 사료된다. 대기중 아이소프렌 농도가 6월 5일과 같이 저녁 시간(오후 6시~7시)에 모사농도가 증가하고, 또한 측정치와 비교해 다소 높은 값을 보이는 이유는 MM5 모사를 통해 구해진 PBL(Planetary Boundary Layer) 높이가 실제보다 일찍 낮아지기 때문으로 사료되며, 다른 연구(i.e., Byun *et al.*, 2005)에서도 이와 같은 아이소프렌 모사농도의 시간 변화를 볼 수 있다.

대기중 아이소프렌 농도는 OH와 같은 라디칼 농도에 영향을 받으며, 한 영역 내의 오존을 비롯한 라디칼 농도는 인위적인 오염원에서 배출되는 NO_x, VOC 등 전구물질의 농도에 따라 변화할 수 있다. 모사 시 이용되는 인위적인 배출량의 불확실성을 고려하게 되면 그림 14에 제시된 아이소프렌 모사 농도 또한 인위적인 배출량 변화에 따라 달라질 가능성을 가지게 된다. 따라서 대기질 모사 시 입력되는 인위적 배출량 변화에 따른 아이소프렌 모사 농도의 변화폭을 알아보기 위하여 본 연구에서는 자동차 등 이동오염원의 NO_x 배출량을 절반으로 감소시킨 배출자료에 대해 CMAQ 모사를 수행하였으며, 그 결과를 그림 16에 제시하였다. 모사에 이용된 2004년 CAPSS 배출량 자료를 볼 때 서울, 인천을 포함한 수도권 지

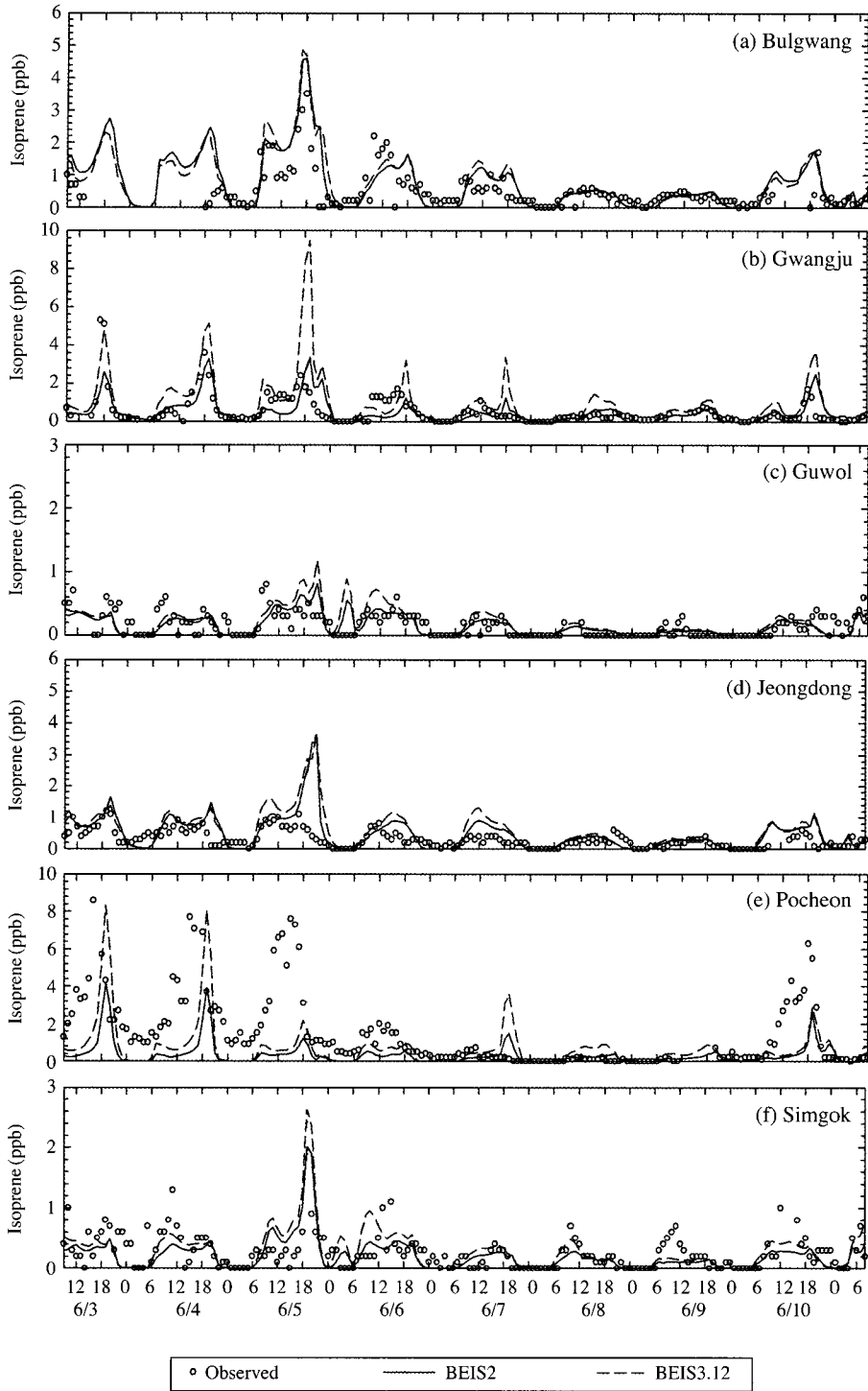


Fig. 14. Hourly isoprene concentrations predicted and observed at the PAMS sites for the period June 3~ June 10, 2004.

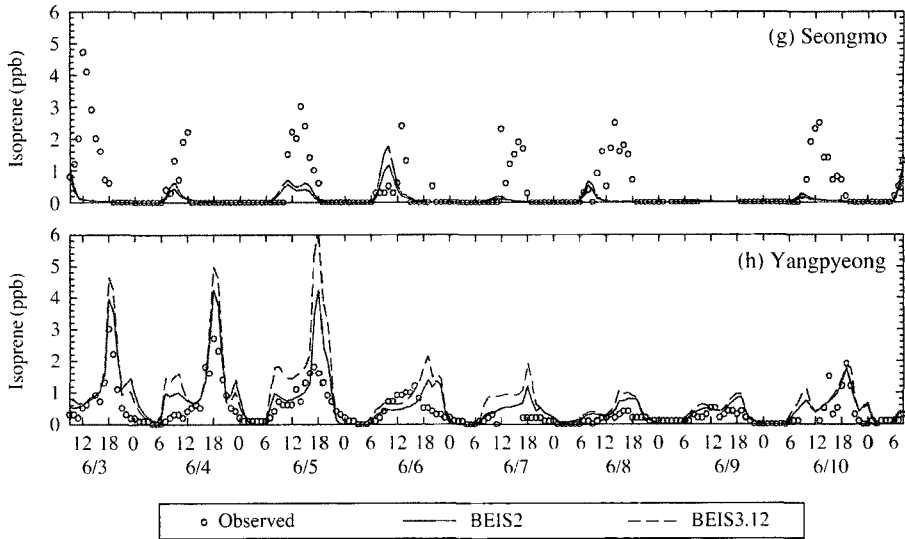


Fig. 14. Continued.

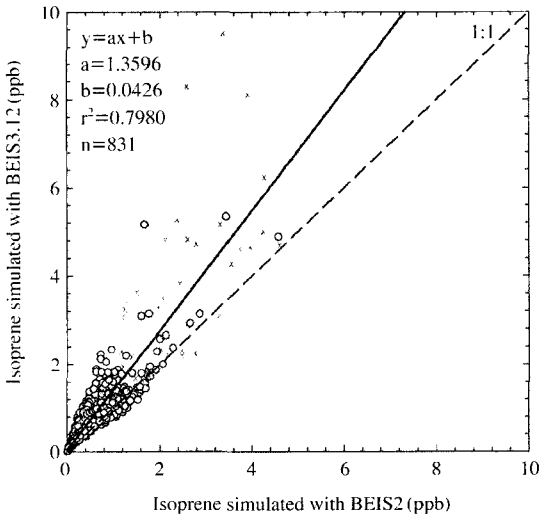


Fig. 15. A scatter diagram of daytime isoprene concentrations simulated with BEIS2 and BEIS3.12 emissions at the PAMS sites. Open circles are used for the concentrations between 7 AM and 5 PM. The isoprene concentrations for 6 PM and 7 PM are separately represented with x.

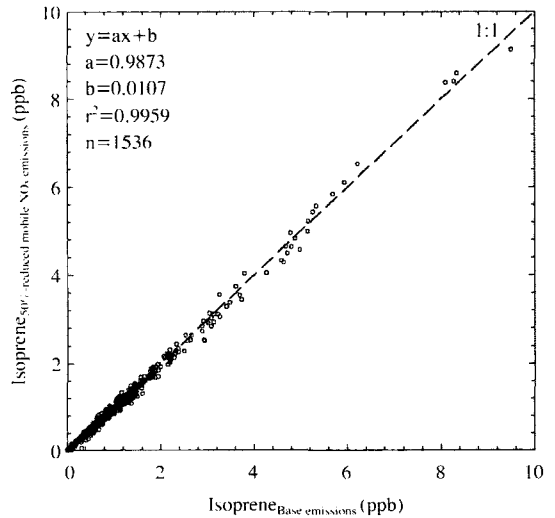


Fig. 16. A sensitivity test on isoprene concentrations for CMAQ simulations with base emissions and after a 50% NO_x reduction from mobile sources. Predicted hourly isoprene concentrations at the 8-PAMS sites at compared for the simulation period. Isoprene emissions estimated with BEIS 3.12 are used for the simulations.

역에서 이동오염원은 총 NO_x 배출량의 50% 가량을 차지하는 것으로 나타나고 있다(Moon *et al.*, 2006). 그림 16에서 보면 인위적인 배출량 변화 전후로 모

사된 아이소프렌 농도의 변화폭은 대부분의 경우 0.2 ppb 미만으로 작은 것을 볼 수 있다. 이를 통해

본 연구에서 산정된 자연배출량을 이용한 대기질 모사 시, 예측된 아이소프렌 농도는 인위적인 배출량 변화에 따른 큰 영향 없이 그림 14와 같은 유사한 수준을 보일 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 남한 지역의 식생 자료를 이용하여 자연 배출량을 산정하였으며, 대기질 모사를 통해 산정된 자연 배출량-아이소프렌을 중심으로 검토하였다. 이용된 식생 자료를 살펴보면 혼합림, 소나무림 그리고 활엽수림이 주요 식생으로 전체 산림 면적의 80% 정도를 차지하였다. 배출계수를 이용한 표준 상태에서의 아이소프렌 배출량을 산정해 본 결과 혼합림과 활엽수림이 중요한 식생으로 전체 배출량의 90% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 식생 자료에 대해 본 연구에서 이용된 BEIS2와 BEIS 3.12의 배출계수의 차이로 인해 발생하는 표준상태 아이소프렌 산정량은 남한 전지역의 경우 20% 범위 내에서 변화하는 것으로 조사되었다.

BEIS2의 경우 BEIS3.12에 비해 일별 일사량에 대한 보정값의 변화폭이 크게 나타났으며, 그러한 영향으로 인해 전체 남한 지역에 대해 실제 기상조건을 고려하여 산정된 아이소프렌 배출량의 경우 맑은 날은 BEIS2가, 흐린 날은 BEIS3.12가 15% 정도 높게 나타났다. 하지만, 이러한 일별 자연배출량의 변화 정도는 대상 영역의 식생자료 분포와 위에서 언급된 배출계수의 적용 등에 영향을 받는 바, 해당 영역에 대한 재검토가 필요하다. 2004년 6월 1일에서 10일 사이 매 시간별 기상자료를 이용하여 산정된 남한 지역의 전체 아이소프렌 배출량은 맑은 날의 경우 200~400 tons/day인 것으로 조사되었다.

CMAQ을 이용하여 모사된 대기중 아이소프렌 농도를 수도권 지역의 광화학 측정망 농도와 비교해 본 결과, 모사기간 중 저녁 시간에 나타나는 몇몇 고농도를 제외하고는 측정치와 비교할 만한 시간별 농도를 얻을 수 있었으며, 기상 조건에 따른 아이소프렌 농도의 일별 변화 패턴 역시 확인할 수 있었다. 모사된 아이소프렌 농도 역시 대상지역의 식생 분포 및 기상 조건에 따라 BEIS2와 BEIS3.12를 이용한 모사에서 차이를 볼 수가 있었다. 수도권 지역의 경

우, BEIS2에 비해 BEIS3.12를 이용한 아이소프렌 모사 농도가 대부분의 관측지점에서 낮 시간 중 35% 가량 높게 나타났으며, 포천, 광주 등에서 관측된 낮 최고 농도와 유사하게 나타나는 등 관측치와의 비교에서 향상된 결과를 보였다.

이러한 자연배출량 및 자연배출 물질농도는 입력되는 식생 자료 등 지역적인 특성이 나타나는 바, 향후 연구에서는 국내 아이소프렌 배출량 산정 시 중요한 혼합림과 활엽수림 등 주요 식생에 대한 세분화 연구, 국내 식생에 대한 배출계수 확보와 이를 이용한 자연 배출량 산정과 활용 그리고 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한 동일한 식생에 대해 개체 밀도, 엽생체량, 수종 변화 등 지역적인 차이를 고려할 수 있는 자료가 준비되어야 할 것으로 기대된다. 끝으로 향후 국내 자연배출량 산정 시 BEIS2 보다는 BEIS3.12 혹은 이후 버전을 보다 많이 이용할 것으로 사료되는 바, 이에 맞는 식생자료의 구분 및 배출계수에 관한 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 한국환경정책·평가연구원의 기본과제(2007IRE-19)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김조천, 김기준, 홍지형, 선우영, 임수길 (2004a) 여름철 참나무속의 이소프렌 배출속도 비교에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 20(1), 111-118.
- 김조천, 홍지형, 강창희, 선우영, 김기준, 임준호 (2004b) 침엽수로부터 발생하는 방향성 테르펜의 배출속도 비교 연구, 한국대기환경학회지, 20(2), 175-183.
- 김태우, 이종범 (1996) 수도권 지역의 자연배출량 산출, 한국대기환경학회, 학술대회는문집, 95-98.
- 문윤섭, 구윤서 (2006) 수도권지역에서 수치 토지피복지도 작성을 통한 대기환경부문 활용사례 연구-MM5 내 기온 및 바람장의 민감도 분석과 식생분포에 기인한 VOC 배출량 및 CO₂ 플럭스의 실시간 산정을 중심으로, 한국대기환경학회지, 22(5), 661-678.
- 손윤서, 김조천, 김기준, 임용재, 선우영, 홍지형 (2006) 갈참

- 나무로부터 발생하는 이소프렌의 배출속도 비교 연구, 한국대기환경학회지, 22(6), 791-798.
- 조규탁, 김조천, 홍지형 (2006) BEIS와 CORINAIR 산출방법에 의한 자연식생 VOC 배출량 산출 비교 연구, 한국대기환경학회지, 22(2), 167-177.
- Benjey, W., M. Houyoux, and J. Susick (2001) Implementation of the SMOKE emissions data processor and SMOKE Tool input data processor in Models-3, U.S. EPA.
- Byun, D.W. and J.K.S. Ching (1999) Science algorithms of the EPA Models3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, EPA600/R99/030, U.S. EPA.
- Byun, D.W. and K.L. Schere (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system, Applied Mechanics Reviews, 59(2), 51-77.
- Byun, D.W., S. Kim, B. Czader, D. Nowak, S. Stetson, and M. Estes (2005) Estimation of biogenic emissions with satellite-derived land use and land cover data for the air quality modeling of houston-galveston ozone nonattainment area, J. of Environmental Management, 75, 285-301.
- Coats, C.J. Jr. (1996) High performance algorithms in the Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) Modeling System, Ninth Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology with the A & WMA, January 28 ~ February 2, 1996, Atlanta, GA.
- Fehsenfeld, F., J. Calvert, R. Fall, P. Goldan, A. Guenther, N. Hewitt, B. Lamb, S. Liu, M. Trainer, H. Westberg, and P. Zimmerman (1992) Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implication for atmospheric chemistry, Global Biogeochemical Cycles 6(4), 389-430.
- Geron, C., A. Guenther, and T. Pierce (1994) An improved model for estimating emissions of volatile organic compounds from forests in the eastern United States, Journal of Geophysical Research, 99, 12773-12792.
- Gery, M.W., G.Z. Whitten, J.P. Killus, and M.C. Dodge (1989) A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling, J. Geophysical Research, 94, 12925.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D. Stauffer (1994) A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5); NCAR Technical Note NCAR /TN-398+STR; National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO.
- Guenther, A., C. Geron, T. Pierce, B. Lamb, P. Harley, and R. Fall (2000) Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America, Atmospheric Environment, 34(12), 2205-2230.
- Guenther, A., C. Nicholas Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, W.A. Mckay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor, and P. Zimmerman (1995) A global model of natural volatile organic compounds, Journal of Geophysical Research, 100, 8873-8892.
- Hanna, S. and J. Wilkinson (2004) Analytical Estimation of Uncertainties in Biogenic Emissions Calculated by BEIS3 due to Uncertainties in Model Inputs and Parameters, 13th International Emission Inventory Conference, Clearwater, FL, June 8 ~ 10, 2004.
- Moon, N.-K., S. Kim, D.W. Byun, and Y. Joe (2006) Air Quality Modeling System: I-Development of Emissions Preparation System with the CAPSS, Project final report, Korea Environment Institute, Seoul, Korea.
- Morris, R.E., B. Koo, A. Guenther, G. Yarwood, D. McNally, T.W. Tesche, G. Tonnesen, J. Boylan, and P. Brewer (2006) Model sensitivity evaluation for organic carbon using two multi-pollutant air quality models that simulate regional haze in the southeastern United States, Atmospheric Environment, 40(26), 4960-4972.
- Pierce, T.E. (2001) Reconsideration of the Emission Factors assumed in BEIS3 for Three USGS Vegetation Categories: Shrubland, Coniferous Forest, and Deciduous Forest. (Available from http://www.epa.gov/CAIR/pdfs/BEIS_documentation.pdf)
- Pierce, T.E., C. Geron, L. Bender, R. Dennis, G. Tonnesen, and A. Guenther (1998) Influence of increased isoprene emissions on regional ozone modeling, J. Geophys. Res., 103, 25622-25629.
- Tsigaridis, K. and M. Kanakidou (2007) Secondary organic aerosol importance in the future atmosphere, Atmospheric Environment, 41(22), 4682-4692.
- Vizuete, W., V. Junquer, E. McDonald-Buller, G. McLaughy, G. Yarwood, and D. Allen (2002) Effects of temperature and land use on predictions of biogenic emissions in Eastern Texas, USA, Atmospheric Environment, 36, 3321-3337.

Wiedinmyer, C., A. Guenther, M. Estes, I.W. Strange, G. Yarwood, and D. Allen (2001) A land use database and examples of biogenic isoprene emission estimates for the state of Texas, USA, *Atmospheric Environment*, 35, 6465-6477.

Yarwood, G., G. Wilson, S. Shepard, and A. Guenther (2002) *User's Guide to the Global Biosphere Emissions and Interactions System (GloBEIS) Version 3*; ENVIRON International Corporation; Novato, CA.