

## BEIS와 CORINAIR 산출방법에 의한 자연식생 VOC 배출량 산출 비교 연구

### A Study on the Comparison of Biogenic VOC (BVOC) Emissions Estimates by BEIS and CORINAIR Methodologies

조 규 탁\* · 김 조 천<sup>1)</sup> · 홍 지 형<sup>2)</sup>

한국환경기술진흥원, <sup>1)</sup>건국대학교 환경공학과, <sup>2)</sup>국립환경과학원 대기총량과  
(2005년 6월 20일 접수, 2005년 12월 26일 채택)

Kyu-Tak Cho\*, Jo-Chun Kim<sup>1)</sup> and Ji-Hyung Hong<sup>2)</sup>

*Korea Institute of Environmental Science and Technology*

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, Konkuk University*

<sup>2)</sup>*Air Quality Management Research Division, National Institute of Environmental Research*

(Received 20 June 2005, accepted 26 December 2005)

#### Abstract

In this study, a fundamental work for developing a biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emission model in Korea has been carried out. Two different approaches, Biogenic Emission Inventory System (BEIS2) and CORINAIR Methodology (CORINAIR) were compared for estimating BVOC emissions. It was found that BEIS and CORINAIR showed very similar results each other. BVOC emissions estimated by two different methods were about the same on a national and regional (provincial) scale. In case of monthly emissions the difference between BEIS and CORINAIR were larger than those on a national and regional (provincial) scale, especially in summer season (June, July and August). Although BEIS and CORINAIR are quite different techniques to correct the environmental conditions, they revealed similar results. Therefore, it is proven that both the methods are able to be applied to the estimation of the BVOC emissions in Korea.

**Key words** : Biogenic VOC emission, BEIS, CORINAIR, NVOC, BVOC

#### 1. 서 론

지난 20년 동안 다양한 대기오염관리 정책을 시행한 결과 SO<sub>2</sub>, 총먼지(TSP) 및 CO 등의 오염도는 상당히 개선되었으나, 오존의 경우에는 아직도 오염도

가 개선되지 않고 있다. 특히 서울을 비롯한 수도권  
의 경우에는 오존 농도가 정체 상태이거나 오히려  
악화되는 경향을 보여주고 있는데, 지금까지 수행된  
오존 관련 연구들에 의하면, 우리나라 도시지역의 오  
존 생성은 휘발성유기화합물(Volatile Organic Com-  
pounds, 이하 VOC) 농도에 지배되는 경향이 강한 것  
으로 평가되고 있으며, 이는 오존 농도 저감을 위해  
서는 VOC 배출량 규제가 효율적이라는 것을 의미한

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-380-0683, E-mail : chokt304@kiest.org

다.

VOC는 다양한 발생원에서 배출되고 있는데, 외국의 선행연구에 의하면 인위적인 배출원 뿐만 아니라 자연식생에 의해서도 많은 양이 배출되는 것으로 알려져 있는데, 전지구적으로 배출되는 자연 VOC (NVOC) 배출량은 1,150 TgC/yr 정도이며, 이 중에서 약 821 TgC/yr가 자연식생에서 배출되는 것(BVOC)으로 평가되었다(Guenther *et al.*, 1995a, b).

우리나라의 경우 자연식생에 의한 VOC 배출량 산출 연구는 아직까지 본격적으로 이루어진 적이 없어서 신뢰할만한 배출량 자료가 작성되지 않고 있지만 국토의 약 65%가 산림이고 농경지가 20%를 차지하고 있으므로 VOC 중 상당량이 자연식생에서 배출될 것으로 추정된다. 조규탁 등(2001)이 수도권 및 강원 지역에서 BEIS2를 이용하여 평가한 1999년 6월의 자연식생에 의한 VOC 배출량은 약 24,700 톤/월로 나타났는데, 국립환경연구원(국립환경연구원, 2004)에서 발표한 1999년 인위적 VOC 배출량의 월평균 20,900 톤보다 큰 것으로 평가되어 자연식생에 의한 VOC 배출량의 기여도가 작지 않은 것으로 나타났다.

최근 국립환경연구원에서는 EU에서 제안한 CORINAIR 배출량 산출방법을 적용하여 자연식생에 의한 국가 VOC 배출량을 평가하였는데, 2001년에는 521천 톤/년으로, 2002년에는 431천 톤/년으로 나타났다. 이를 2001년 인위적 배출량 712천 톤/년, 2002년 배출량 723천 톤/년과 비교하면 국가 총배출량의 약 40% 정도가 자연식생에서 배출되는 것으로 추정된다(국립환경연구원, 2004).

그런데 지금까지의 연구들은 외국에서 개발한 방법론을 국내에 적용하는 수준에 머무르고 있는데, 특히 배출계수와 같은 중요 인자를 외국 자료에 의존하고 있으며 기상인자 등 자료의 부족으로 산출 결과의 신뢰성을 평가하지 못하고 있다.

다행스럽게도 최근에 자연식생에 의한 VOC 배출량에 대한 관심이 높아지고 있는데, 국립환경연구원(2004, 2003, 2002)에서는 국내 대표 식생인 참나무속 및 소나무속에 대한 배출계수 개발 및 열생체량 등을 평가하는 연구를 수행하였으며, 또한 식생분포에 대한 데이터베이스를 활용할 수 있어서 우리나라에서도 본격적인 자연 VOC 배출량 산정연구가 가능할 것으로 판단된다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 국내외 선행 연구를 검토하여 우리나라 실정에 적합한 자연 VOC 배출량 산출방법을 확립하고자 하였으며 특히, BEIS (Biogenic Emission Inventory System)와 CORINAIR 산출방법을 비교하여 국내 실정에 적합한 자연식생에 의한 VOC 배출모형의 개발방향을 모색하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 배출량 산정기본식

자연식생에 의한 배출량 산정은 Guenther *et al.* (1994)이 제안한 아래의 식 1과 식 2에 기초하고 있는데, 미국의 BEIS (Biogenic Emission Inventory System), 유럽의 자연VOC 배출모델 등은 이 산정식을 기반으로 개발되었다.

#### 2.1.1 산림지역

$$ER_i = \sum_{j=1}^n [A_j \cdot FF_j \cdot EF_{ij} \cdot F(S, T)] \quad (1)$$

ER<sub>i</sub>: Emission rate of each chemical species (i), μg/h

A<sub>j</sub>: Area of vegetation for each vegetation type (j), m<sup>2</sup>

FF<sub>j</sub>: Foliar density factor for each vegetation type (j), g-leaf/m<sup>2</sup>

EF<sub>ij</sub>: Emission factor for each chemical species (i) and vegetation type (j), μg/g-leaf/h

F(S, T): Environmental factor accounting for solar radiation (S) and leaf temperature (T), unitless

#### 2.1.2 비산림지역

$$ER_i = \sum_{j=1}^n [A_j \cdot EF_{ij} \cdot F(S, T)] \quad (2)$$

ER<sub>i</sub>: Emission rate of each chemical species (i), μg/h

A<sub>j</sub>: Area of vegetation for each vegetation type (j), m<sup>2</sup>

EF<sub>ij</sub>: Emission flux factor for each chemical species (i) and each landuse type (j), μg/m<sup>2</sup>/h

F(S, T): Environmental factor accounting for solar radiation (S) and leaf temperature (T), unitless

위 식 1, 2에서 알 수 있는 것처럼 배출량을 평가하기 위해서는 식생분류(vegetation type)에 따른 배

출계수 (EF), 엽생체량 (FF) 및 환경보정인자 (F(S, T)) 등이 필요한데, 이 자료들은 국가 또는 지역별로 상이하므로 연구대상지역에서 확보한 자료를 활용하는 것이 바람직하다.

2.2 배출량 산정방법

현재 자연식생에 의한 배출량 산정방법은 대부분 Guenther *et al.* (1994)이 제안한 방법에 기초하고 있지만 기상인자를 고려하는 과정에서 서로 다른 방식을 적용하기 때문에 배출량 평가 결과에 차이가 발생할 수 있다. 자연식생에서 배출되는 화학물질 중에서 이소프렌은 태양광량과 수관상부 기온에 따라서 배출량이 변하며, 모노테르펜과 기타 VOCs는 기온에 의하여 배출량이 변하게 된다.

2.2.1 BEIS 배출량 평가방법

BEIS에 의한 배출량은 BEIS version 2 (BEIS2)에서 제시하고 있는 매시간별 기상인자 보정방법을 적용하여 평가하였다. BEIS2에서는 기상보정인자 F(S, T)를 오염물질에 따라 다르게 산정하고 있는데, 수관상부의 기온과 태양광량의 함수라고 가정하고 있다.

- 이소프렌 (Isoprene)

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

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

$$C_T = \frac{\exp[c_{T1}(T - T_s)/RT_s T]}{1 + \exp[c_{T2}(T - T_M)/RT_s T]} \quad (3)$$

I=isoprene emission rate=EF<sub>ij</sub>  
 I<sub>s</sub>: isoprene emission rate at the standard temperature (30°C) and PAR flux [1,000 μmol (m)<sup>-2</sup> (s)<sup>-1</sup>]  
 C<sub>L</sub>=light correction factor  
 C<sub>T</sub>=temperature correction factor  
 L=PAR flux, μmol (m)<sup>-2</sup>(s)<sup>-1</sup>  
 T=temperature, K  
 T<sub>s</sub>=standard temperature, 303K  
 T<sub>M</sub>=empirical coefficient, 314 K  
 α=empirical coefficient, 0.0027  
 c<sub>L1</sub>=empirical coefficient, 1.066  
 R=the ideal gas constant, 8.314 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>  
 c<sub>T1</sub>=95,000 Jmol<sup>-1</sup>  
 c<sub>T2</sub>=230,000 Jmol<sup>-1</sup>

- 모노테르펜 (monoterpene) 및 기타 휘발성유기화합물 (other VOC)

$$M = M_s \cdot \exp[\beta(T - T_s)] \quad (4)$$

M=monoterpene emission rate at leaf temperature T  
 (K)=EF<sub>ij</sub>  
 M<sub>s</sub>=standard emission rate at T<sub>s</sub> (303 K)  
 β=empirical coefficient, 0.09

위 식 3, 4에서 살펴보면 이소프렌의 경우에는 태양광량으로서 광합성유효광 (photosynthetically active radiation, 이하 PAR)을 이용하게 되는데, 수관 표면에 도달한 태양광은 수관층을 통과하면서 감소하며, 광량 보정인자 C<sub>L</sub>은 각 층에서 산정한 값의 총합이다(식 5).

$$C_L = \sum_{i=1}^5 C_L(i) \quad (5)$$

$$C_L(i) = F(PAR_i, SLW_i)$$

BEIS2에서는 광량의 감소를 추정하기 위하여 Simple Canopy 모델을 이용하는데, 수관층은 5층으로 구분하며 각 수관층별 PAR의 양은 아래의 식 6에 의해 산출된다(Guenther, 1994).

$$PAR_i = PAR \times \exp\left[-E_L \times LAI \times \frac{(2i-1)}{10}\right] \quad (6)$$

PAR<sub>i</sub>=photosynthetically active radiation at a canopy layer i (W/m<sup>2</sup>)  
 PAR=photosynthetically active radiation at the surface of canopy (W/m<sup>2</sup>)  
 E<sub>L</sub>=extinction coefficient of PAR through a canopy (0.28 ~ 0.84). 0.42 is used in BEIS2  
 LAI=leaf area index. Pine tree, deciduous tree and other conifer have 3, 5, and 7, respectively  
 i=number of canopy layer (i=1, 2, 3, 4, 5)

위의 식 6에서 얻어진 PAR를 이용하여 산정한 각 층별 보정인자 (C<sub>L</sub>)는 해당 수관층의 배출량에만 영향을 미치는데, BEIS2에서는 각 층별 엽생체량만큼 영향을 미친다고 가정하고 각 층별 엽생체량 분포비를 이용하여 가중하는 방법을 적용하였다. BEIS2에서는 침엽수림의 수관층별 생체량은 일양분포

(uniform distribution)를 가정하였고, 활엽수는 아래의 식 7을 이용하여 평가하고 있다(Guenther, 1994).

$$SLW_i = 63.109 + 37.838 \times \exp[-1 \times (i-1)] \quad (7)$$

SLW<sub>i</sub> = foliar density in canopy layer i (gdw/m<sup>2</sup>)

i = number of canopy layer (i=1, 2, 3, 4, 5)

아래 그림 1에는 BEIS2에서 사용하고 있는 수관층 구분 개념도가 제시되어 있고, 표 1, 2에는 식 6, 7을 이용하여 추정된 수관층별 기상인자 특성 값들이 제시되어 있다.

2.2.2 CORINAIR 배출량 평가방법

CORINAIR 배출량 산정지침 (EEA, 1999)에 따르면 아래에 제시된 가정을 기초로 Guenther *et al.* (1994)이 제안한 방법을 수정하여 월별 배출량을 산

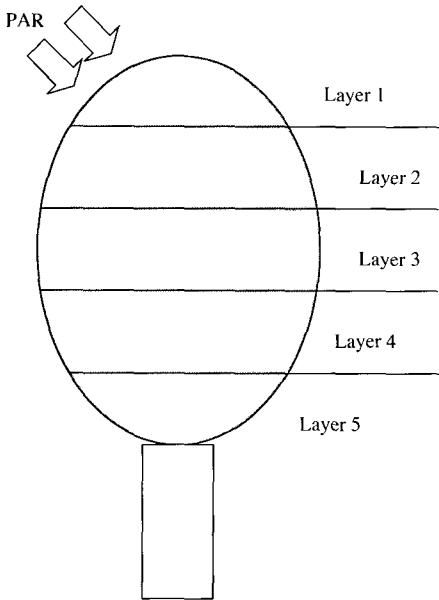


Fig. 1. Structure of layers in a canopy.

Table 1. Penetration rates of PAR in each canopy layer.

Layer	Pinus	Other coniferous	Deciduous
1	0.88	0.75	0.81
2	0.69	0.41	0.53
3	0.53	0.23	0.35
4	0.41	0.13	0.23
5	0.32	0.07	0.15

정하고 있다.

가정1) 일사량 보정계수(C<sub>L</sub>)는 단순 step function에 의하여 추정할 수 있는데, 낮 시간에 대해서는 C<sub>L</sub>에 1을 부여하고, 밤 시간에는 0을 부여한다. 낮 시간은 일사강도가 200 μmol/m<sup>2</sup>/sec 이상인 시간을 의미한다.

가정2) 온도보정인자인 C<sub>T</sub>와 M은 매시간 기온 대신에 월평균 기온을 이용하여 근사적으로 추정할 수 있다.

가정3) 수관 표면의 일사량 및 온도는 수관층 내 일사량 및 온도의 합리적 근사값이다.

CORINAIR 배출량 산정지침 (EEA, 1999)에 따르면 가정1은 상대적으로 정확한 반면에 가정2 및 가정3은 불확실성이 크다고 한다.

수정된 배출량 산정식에서 낮 시간의 길이(N<sub>L</sub>)는 매월 15일에 위도와 일중 시각의 함수로서 계산되며, 해당 월 모든 날짜에 대해 동일하다고 가정한다. CORINAIR 산출방법에서는 수관층별 PAR의 감소는 고려하지 않는다.

기온 보정계수는 물질별로 제시된 식 8을 이용하여 평가하는데, 매시간별 기온 대신에 월평균기온을 이용하게 된다.

$$Emis(isoprene) = \sum_{mm=mm1}^{mm2} A \cdot D \cdot \gamma_{iso}(T_{mm}) \cdot N_d(mm) \cdot N_L(mm)$$

$$Emis(monoterpenes) = \sum_{mm=mm1}^{mm2} A \cdot D \cdot \gamma_{mts}(T_{mm}) \cdot N_d(mm) \cdot 24$$

$$Emis(OVOC) = \sum_{mm=mm1}^{mm2} A \cdot D \cdot \gamma_{ovoc}(T_{mm}) \cdot N_d(mm) \cdot 24 \quad (8)$$

mm1, mm2: the start and end of the growing season

Table 2. Distribution ratios of leaf biomass in each canopy layer.

Layer	Pinus	Other coniferous	Deciduous
1	0.2	0.2	0.27
2	0.2	0.2	0.21
3	0.2	0.2	0.18
4	0.2	0.2	0.17
5	0.2	0.2	0.17

for a particular vegetation type

- $N_d$  (mm): the number of days on a month (mm)
- $N_L$  (mm): the number of light-hours per day on a month (mm)
- $T_{mm}$ : the monthly mean temperature on a month (mm)

**2.3 토지이용 및 식생분포**

식생분포는 자연 VOC 배출량 평가에서 매우 중요한 요소로서 배출계수 개발의 기초자료이다. BEIS2에서는 약 127종의 토지이용 및 식생을 구분하였으며, 최근에 개발이 완료된 BEIS3에서는 약 230여종의 토지이용 및 식생 분류가 이용되고 있다 (Vukovich and Pierce, 2002). 우리나라에서 전국 규모로 활용 가능한 식생자료는 임상도와 현존식생도가 있는데, 이 자료들은 구축 및 활용목적에서 차이가 있기 때문에 식생구분이 다르므로, 본 연구에서는 임업연구원에서 구축한 수치임상도를 기반으로 식생분포를 평가하였다(표 3 및 그림 2 참조).

**2.4 엽생체량 (FF) 및 엽면적지수 (LAI)**

엽생체량은 식 1에 제시된 것처럼 산림의 식생종류별 단위면적당 배출플럭스 ( $g/m^2\text{-land/hr}$ ) 산정에 이용되는데, 본 연구에서는 최종 배출플럭스 자료를 활용하였으므로 별도의 자료가 필요하지 않았다.

엽면적지수는 수관을 통과하면서 감소하는 광량을

추정하기 위한 자료로 활용되는데, 국내 연구에서 구축된 자료를 먼저 활용하고, 부족한 경우에는 BEIS2에서 제시된 자료를 활용하였는데, 소나무, 활엽수, 기타침엽수에 대하여 각각 3,5 및 7을 적용하였다.

**2.5 배출계수 및 배출플럭스 ( $\mu g/m^2\text{-land/hr}$ )**

배출플럭스는 단위지표면적당 시간당 배출량을 의미하며, 식생종류별 배출계수 및 엽생체량 자료를 이용하여 평가하는데, 식생종류에 따라서 변한다.

$$\text{배출플럭스 } (\mu g/m^2\text{-area/hr}) = \text{배출계수 } (\mu g/gdw\text{-leaf/hr}) \times \text{엽생체량 } (gdw\text{-leaf}/m^2\text{-area}) \quad (9)$$

배출플럭스는 식생종류별 배출계수와 엽생체량을 이용하여 평가하므로 계절에 따라서 변하게 된다. 국내에서 현재 배출계수 및 엽생체량 자료를 연구 중이며, 본 연구에서는 소나무와 일부 참나무 수종에 대해서는 국내 자료를 활용하였고, 기타 수종에 대해서는 BEIS2에 제시된 자료를 적용하였다(표 4). 배출플럭스는 표준기상조건인 30°C 및 1000  $\mu\text{mol}/m^2/\text{sec}$ 에서의 값으로 표현되며, 실제 환경조건을 이용하여 보정하게 된다. 본 연구에서는 BEIS2와 CORINAIR 산출방법을 비교하는 것이 목적이므로 동일한 조건에서 연구를 수행하기 위하여 동일한 배출플럭스를 적용하였다. 표 4에서 알 수 있는 것처럼 배출플럭스는 겨울과 여름에 차이가 있는데, 본 연구에서는 4월부터 10월까지를 여름으로, 11월부터 3월까지를 겨울로 가정하였다.

**2.6 기상자료**

국내 기상관측자료의 경우 일사량을 측정하고 있는 관측소가 몇 개 되지 않아서 본 연구에서는 ASHRAE 알고리즘 (Iqbal, 1983)을 이용하여 일사량을 평가한 후 약 50%를 PAR라고 가정하였다. 전술한 것처럼 수관층 투과에 따른 PAR의 변화는 Guenther *et al.* (1994)가 제안한 simple canopy model을 이용하였다. CORINAIR 산출방법에서 이용하는 일사량 보정계수를 산정하는 과정에서 ASHRAE 알고리즘 (Iqbal, 1983)을 이용하여 추정된 일사량 자료를 적용하였다.

기상자료는 전국을 7개의 권역으로 구분하여 적용하였으며, 각 권역내에서는 동일한 기상자료를 이용하였다. 7개의 기상권역은 수도권 (서울, 인천, 경기),

**Table 3. Vegetation classification in Korean forest map.**

Korea code	Description	BEIS2 code	Description
CA	Planted chestnut	Cast	Castanea (chestnut)
C	Conifer forest	Cnif	BEIS conifer forest
PC	Planted conifer forest	Cnif	BEIS conifer forest
PL	Larch	Lari	Larix (larch)
M	Mixed forest	Nmxf	N mixed forest
PO	Planted oak	Quer	Quercus (Oak)
Q	Oak	Quer	Quercus (Oak)
H	Deciduous forest	Odcd	BEIS deci forest
PH	Planted deciduous forest	Odcd	BEIS deci forest
LP	Pasture	Past	Pasture
D	Pine	Pinu	Pinus (pine)
K	Korean white pine	Pinu	Pinus (pine)
PD	Planted pine	Pinu	Pinus (pine)
PK	Planted Korean white pine	Pinu	Pinus (pine)
PR	Pitch pine	Pinu	Pinus (pine)
L	Agricultural land	Rice	Rice

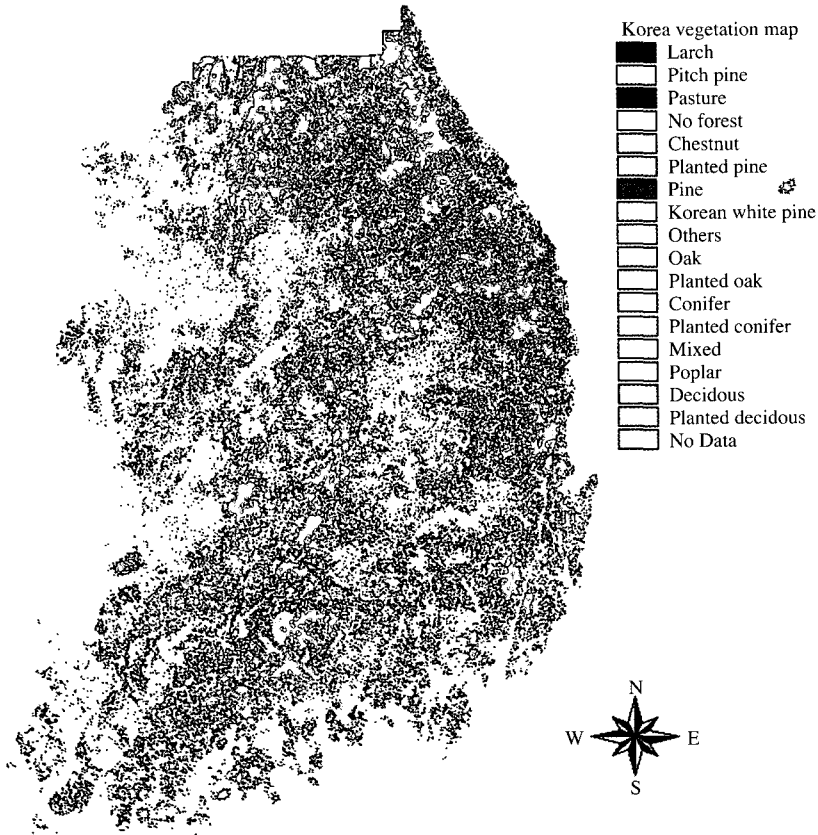


Fig. 2. A vegetation map of the study area.

Tables 4. Summary on emission fluxes according to vegetation types.

(unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{-area}/\text{hr}$ )

Code	Vegetation Description	Summer				Winter			
		ISOP	MONO	OVOC	LAI	ISOP	MONO	OVOC	LAI
CA	Planted chestnut	42.5	42.5	693.7	5	0	0	0	5
C	Conifer forest	745.4	1366.6	993.9	9	0	1353	835	9
PC	Planted conifer forest	745.4	1366.6	993.9	9	0	1353	835	9
PL	Larch	42.5	42.5	693.7	5	0	0	0	5
M	Mixed forest	10150	1100	850	5	175	1100	850	1
PO	Planted oak ( <i>Quercus serrata</i> )	36063	85	693.7	5	0	0	0	5
Q	Oak ( <i>Quercus serrata</i> )	36063	85	693.7	5	0	0	0	5
H	Deciduous forest	2112.4	368.8	871.8	6	0	313	183	6
PH	Planted deciduous forest	2112.4	368.8	871.8	6	0	313	183	6
LP	Pasture	56.2	140.5	84.3	0	0	0	0	0
D	Pine ( <i>Pinus densiflora</i> )	79.3	2463	1295	3	79.3	2463	1295	3
K	Korean white pine	79.3	2380	1295	3	79.3	2380	1295	3
PD	Planted pine ( <i>Pinus densiflora</i> )	79.3	2380	1295	3	79.3	2380	1295	3
PK	Planted Korean white pine	79.3	2380	1295	3	79.3	2380	1295	3
PR	Pitch pine ( <i>Pinus rigida</i> )	79.3	1630	1295	3	79.3	1630	1295	3
L	Rice	102	255	153	0	0	0	0	0

note: ISOP (isoprene), MONO (monoterpene), OVOC (other VOCs), LAI (leaf area index)

강원권(강원), 충청권(충북, 대전, 충남), 전라권(전북, 광주, 전남), 경북권(경북, 대구), 경남권(경남, 부산, 울산), 제주권(제주) 등이었으며, 각 권역별 기상측정 지점은, 수도권은 서울, 강원권은 대관령, 충청권은 청주, 전라권은 광주, 경북권은 안동, 경남권은 마산, 제주권은 제주이었다.

BEIS2에는 2000년도에 각 지점에서 측정된 매시간별 기상자료가 이용되었으며, CORINAIR 산출방법에서는 월별로 평균화된 자료가 적용되었다.

### 2.7 배출량 산정 및 분석

BEIS2를 이용한 배출량은 먼저 매시간별 배출량을 1년간 산정하고 이를 월별로 집계하였다. CORINAIR 산출방법에 의한 배출량은 월별로 기상인자를 통계 처리한 다음 배출량을 산정하였다. 본 연구에서는 2000년도 전국에 대하여 시도별 배출량을 산정하였으며, 산정된 배출량에 대해서는 국가배출량, 시도배출량, 월배출량 등을 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 물질별 배출량

아래 표 5에는 두 방법에 의한 물질별 배출량 산정결과가 제시되어 있는데, BEIS2가 CORINAIR 산

Table 5. Emissions estimated by BEIS2 and CORINAIR.

	Emission (ton/year)			
	Isoprene	Monoterpene	Other VOCs	Total
BEIS2 (A)	140,628	177,399	140,0771	458,104
CORINAIR (B)	141,545	181,284	139,120	461,950
Difference (B-A)	917	3,886	-957	3,846

출방법보다 배출량을 약간 크게 평가하는 것으로 나타났다. BEIS2에 의한 배출량은 약 46.4만 톤/년이었 고, CORINAIR 산출방법에 의한 배출량은 약 46.2만 톤/년이었다. BEIS2가 CORINAIR 산출방법보다 배 출량을 약 0.5% 크게 평가하여 방법론에 따른 차이 는 거의 없었다.

BEIS2에 대하여 CORINAIR 산출방법에 의한 배 출량이 이소프렌은 약 0.7%, 모노테르펜은 0.4% 크 게 평가되었고 기타 VOC는 2.6% 정도 작게 나타나 방법론별 물질별 배출량 차이도 거의 없었다.

아래 그림 3은 두 방법에 의한 배출량의 오염물질 별 구성비를 보여주는데, BEIS2는 이소프렌 30%, 모노테르펜 39%, 기타 VOC 31%의 비율을 나타냈 으며, CORINAIR 산출방법은 이소프렌 31%, 모노테르펜 39%, 기타 VOC 30% 등의 배출비율을 보여주어, 두 배출자료가 거의 유사한 것으로 평가되었다.

### 3.2 공간적 배출량

아래 표 6은 두 방법에 의한 공간적 배출량과 구 성비를 나타낸 것으로서 시도 단위의 공간 규모에서 배출량을 분석하였다. 시도별 배출량을 살펴보면 두 방법 모두 경북에서 가장 큰 배출량을 보여주었고, 경남, 강원, 전남 등도 배출량이 큰 것으로 평가하였 다. 시도별 구성비를 살펴보면 배출량 산정방법에 따 른 차이는 크지 않았고 또한 일관된 경향도 나타내 지 않았다. BEIS2 구성비를 기준으로 하였을 때, 강 원, 경북, 경남 등에서는 CORINAIR 산출방법에 의한 시도별 구성비가 작게 나타났으나, 나머지 시도에서 는 크거나 비슷하게 평가되었다.

두 방법에 의한 배출량의 공간적인 차이를 비교하 기 위하여 BEIS2에 의한 배출량에 대한 CORINAIR 산출방법에 의한 배출량의 상대비율을 살펴보았는

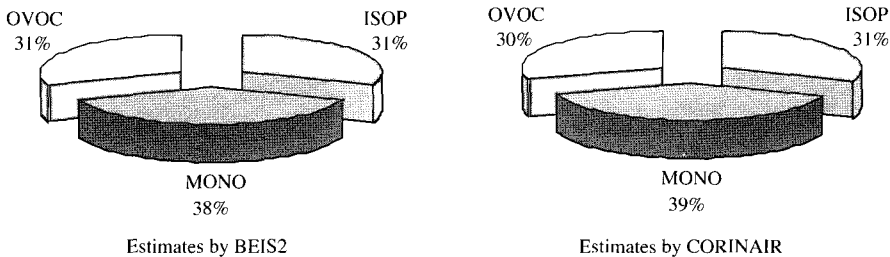


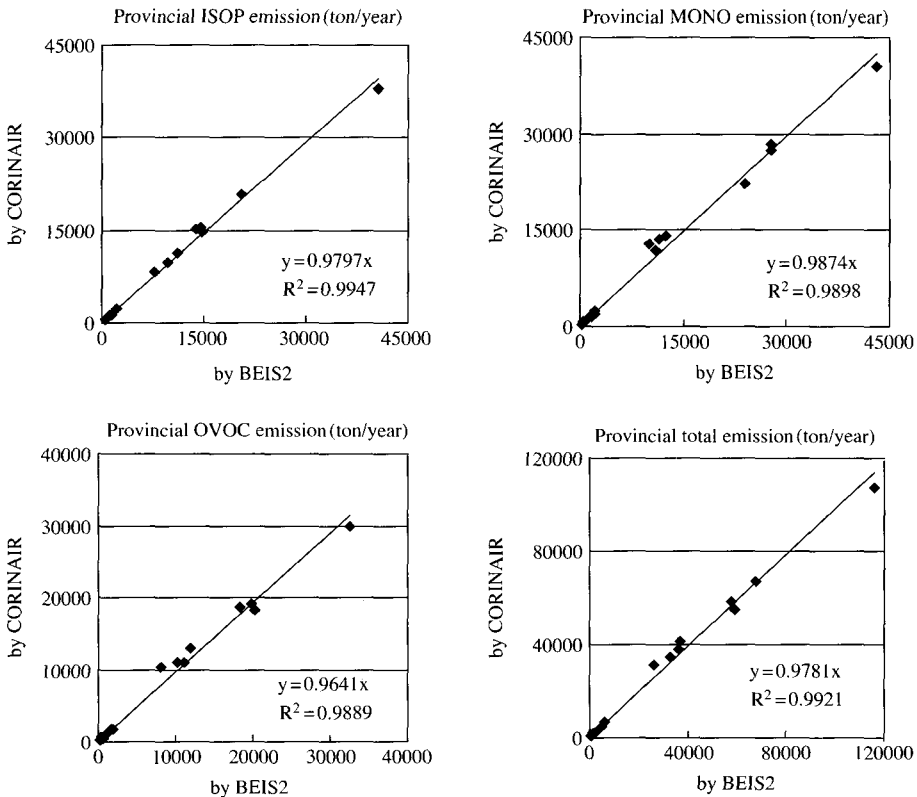
Fig. 3. Composition ratios of three pollutant emissions estimated by BEIS2 and CORINAIR.

**Table 6. Regional biogenic VOCs emissions estimated by BEIS2 and CORINAIR.**

(unit : ton/year)

Region	Emission by BEIS2					Emission by CORINAIR					Ratio (B/A)
	ISOP	MONO	OVOC	Total <sup>A</sup>	Ratio (%)	ISOP	MONO	OVOC	Total <sup>B</sup>	Ratio (%)	
Seoul	430	221	275	927	0.2	472	249	279	1,000	0.2	1.079
Busan	1,278	1,636	1,063	3,978	0.9	1,300	1,621	1,050	3,972	0.9	0.999
Daegu	1,483	1,568	1,142	4,192	0.9	1,391	1,511	1,083	3,985	0.9	0.951
Incheon	774	515	520	1,809	0.4	852	638	592	2,082	0.5	<b>1.151</b>
Gwangju	480	883	552	1,914	0.4	477	869	543	1,890	0.4	0.987
Daejeon	417	478	507	1,402	0.3	629	740	685	2,055	0.4	<b>1.465</b>
Ulsan	2,295	2,204	1,724	6,224	1.4	2,337	2,418	1,843	6,598	1.4	1.060
Gyeonggi	13,688	11,553	11,960	37,201	8.1	15,074	13,623	12,953	41,650	9.0	<b>1.120</b>
Gangwon	<b>14,838</b>	<b>23,863</b>	<b>20,294</b>	<b>58,995</b>	12.9	14,658	22,332	18,260	55,250	12.0	0.937
Chungbuk	14,395	11,068	11,001	36,465	8.0	15,361	11,792	11,014	38,167	8.3	1.047
Chungnam	7,688	10,004	8,179	25,871	5.6	8,241	12,945	10,254	31,440	6.8	<b>1.215</b>
Jeonbuk	9,750	12,530	10,293	32,573	7.1	9,719	13,982	11,046	34,747	7.5	1.067
Jeonnam	11,203	27,884	18,367	57,454	12.5	11,221	28,509	18,755	58,485	12.7	1.018
Gyeongbuk	40,533	43,096	32,574	116,204	25.4	38,015	40,600	29,984	108,599	23.5	0.935
Gyeongnam	20,497	27,784	19,716	67,998	14.8	20,846	27,434	19,055	67,335	14.6	0.990
Jeju	877	2,110	1,911	4,898	1.1	951	2,023	1,722	4,695	1.0	0.959
<b>Total</b>	<b>140,628</b>	<b>177,399</b>	<b>140,077</b>	<b>458,104</b>	100.0	141,545	181,284	139,120	461,950	100.0	1.008

note: ISOP (isoprene), MONO (monoterpene), OVOC (other VOC)



**Fig. 4. Linear relationships between VOC emissions by BEIS2 and CORINAIR.**



데, 표 6에서 살펴보면 16개 시도 중에서 대전 (46.5%), 충남 (21.5%), 인천 (15%), 강원 (-15%), 경기 (12%) 등 5개 지역에서 10% 이상의 큰 차이를 보여주었다. 이러한 차이에는 두 방법에서 이용하고 있는 환경보정인자의 생성방식 이외에도 권역별 수증 분포도 영향을 미치고 있다. 소나무의 경우에는 두 방법의 환경보정방식의 차이가 비교적 작은 반면에 활엽수림과 소나무의 침엽수림의 경우에는 차이가 크게 나타나고 있다. 즉 산림의 구성에서 활엽수림과 기타 침엽수림 또는 침활혼효림의 비율이 큰 지역은 두 방법에 의한 차이가 크게 나타날 수 있다.

아래 그림 4는 두 방법에 의한 시도별 배출량의 차이를 살펴보기 위하여 상관성을 분석한 결과이다. 그림에서 살펴보면 오염물질에 따라서 조금씩 선형 관계에 차이를 나타내고 있지만 모든 오염물질에서 전반적으로 양호한 선형관계를 보여주고 있다. 이소프렌이 가장 높은 선형관계를 나타냈으며 ( $R^2=0.9947$ ), 모노테르펜 ( $R^2=0.9829$ )과 기타 VOC ( $R^2=0.9791$ )도 매우 높은 선형관계를 보여주었다. 기올기는 이소프렌, 모노테르펜 및 기타 VOC가 각각

0.9797, 0.9681, 0.9408 등을 나타내 상관성과 마찬가지로 매우 높은 선형성을 보여주었다.

위의 결과들을 종합해 보면 두 방법에 의한 배출량 산정결과에서 일부 지역별 차이가 나타나고 있지만 선형성 및 기올기 분석에서 알 수 있듯이 CORINAIR 배출량 산정방법이 BEIS2를 비교적 잘 근사하고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 시간별 배출량

아래 그림 5는 두 방법에 의한 월별 배출량을 각 물질 및 총량에 대하여 비교한 것이다. 그림에서 살펴보면, 전반적으로 유사한 배출량을 보여 주었지만, 5, 7월 및 8월에 다소 차이가 큰 것으로 나타났다. 월별 변화 경향은 두 방법 사이에 일관된 경향을 보여 주지 않았으나, 여름철의 경우에 CORINAIR 산출방법의 배출량이 좀 더 큰 값을 나타냈다. 실제 배출량은 여름철인 7월 및 8월에 가장 큰 차이를 나타냈으며, BEIS2에 대한 상대비율은 0.86~1.17을 나타냈다.

지금까지 살펴본 것처럼 BEIS2 및 CORINAIR 산

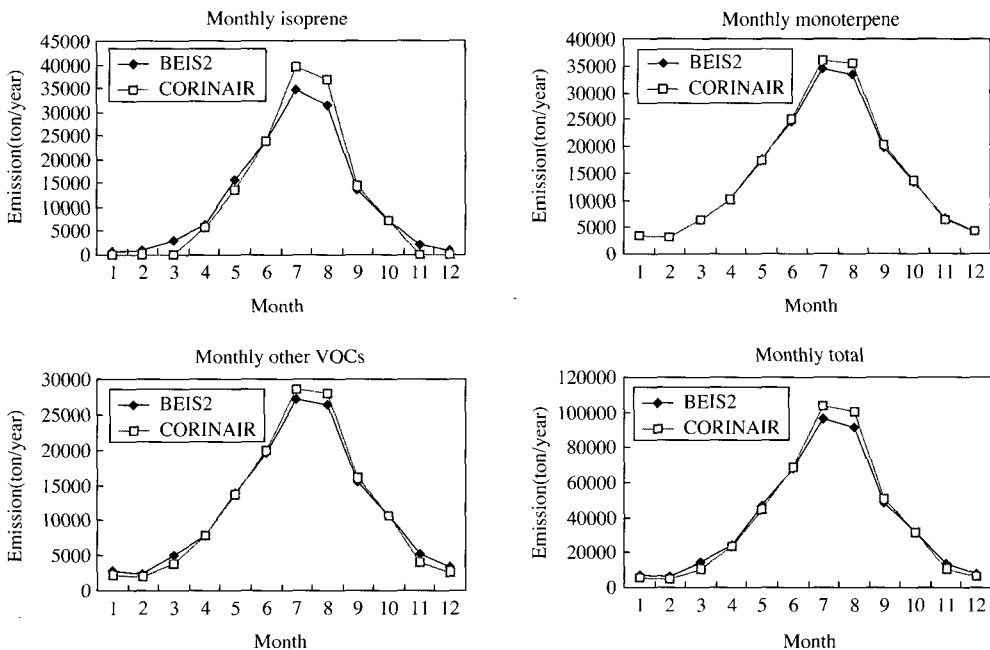


Fig. 5. Comparison of total, monoterpene, isoprene and other VOC emissions estimated by two different methods-BEIS2 and CORINAIR.

Table 7. Applicabilities of two different methods-BEIS2 and CORINAIR.

Method	Developing agency	Objectives	Data needed
BEIS2	US EPA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- To develop the high resolution emissions (gridded and hourly emission)</li> <li>- To present the input data of air quality modeling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hourly meteorological data in each grid (temperature and PAR)</li> <li>- Gridded area of each vegetation type (km<sup>2</sup>) (1 km × 1 km, 3 km × 3 km or 5 km × 5 km grid is usually used)</li> </ul>
CORINAIR	EU EEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- To develop the national or regional scale emissions</li> <li>- To develop the annual or monthly emissions</li> <li>- To present the basic data for policy-making</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monthly meteorological data (temperature)</li> <li>- Total area of each vegetation type in the study area (km<sup>2</sup>)</li> </ul>

출방법에 의한 배출량 평가 결과는 유사한 것으로 나타났다. 총배출량의 차이도 거의 나타나지 않았고, 물질별 배출량 차이도 보이지 않았다. 또한 시도별 배출량 차이도 매우 작은 것으로 나타났으나, 월별 배출비율의 경우 이소프렌에서 산정방법에 따른 차이를 보여 주었으며, 오존 에피소드가 발생하는 5, 7월 및 8월에 다른 계절에 비해 큰 차이를 나타냈지만 실제 배출량 차이는 그렇게 크지 않았다.

현재 자료의 부족으로 자연식생에 VOC 배출량의 불확실성에 대한 정량적 평가를 수행하기 어렵지만, 기초 자료로 이용되는 배출계수, 연생체량, 엽면적지수, 식생면적분포 등에서 발생하는 불확실성이 상당히 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 BEIS2와 CORINAIR 산출방법에 의한 여름철 배출량 차이는 통계적으로 유의하지 않을 것으로 추정되며, 향후 국내 자료를 기반으로 이에 대한 평가가 필요하다.

배출목록 작성목적은 다양하며 목적에 따른 적절한 배출량 평가방법이 필요하다. EU에서 현재 이용되는 CORINAIR 배출량 산출방법은 평균경향을 이용함으로써 국가 및 지역단위 월별배출량을 쉽게 평가할 수 있는 반면에 대기질 모델링에서 요구되는 격자별 시간별 고해상도 자료를 생성하기 위해서는 별도의 접근이 요구된다. 반면에 BEIS2는 격자별 시간별 기상자료를 활용함으로써 실제 현상에 근접한 고해상도 자료 산출이 가능하지만 연간(또는 월별) 지역별 배출량을 평가하기 위해서는 대용량의 자료를 처리해야 하기 때문에 상당히 많은 시간 및 비용을 필요로 한다. 그러므로 배출목록 작성목적에 따라 다음과 같이 배출량 산정방법을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다(표 7).

#### 4. 결 론

이 연구에서는 그동안 국내에서 상대적으로 연구가 이루어지지 않았던 자연식생에 의한 VOC 배출량 평가방법을 확립하기 위해 현재 유럽과 미국에서 배출량 산정에 이용하고 있는 BEIS2 배출모형과 CORINAIR 배출량 산출방법론의 국내 적용가능성을 검토하였다. 임업연구원에서 구축한 시도별 임상자료, 2000년도 기상관측자료, BEIS2의 배출플렉스 및 국내 개발 배출플렉스 등을 기초자료로 활용하여 두 방법에 의한 물질별, 공간적, 시간적 배출량을 산정하여 비교한 연구결과는 다음과 같다.

1) 두 방법에 의한 물질별 배출량 산정결과는 매우 유사한 것으로 나타났다. BEIS2에 의한 배출량을 기준으로 살펴보면, 물질별로는 -2.6~0.7%의 차이를 나타냈으며, 총 VOC 배출량의 차이는 0.5%로 나타났다.

2) 시도별 배출분포도 지역별로 거의 유사한 것으로 나타났는데, 두 배출량 자료의 선형성 분석에 의하면 물질별로 기울기 0.94~0.97, 결정계수( $R^2$ ) 0.9791~0.9947을 보여주어 두 자료가 매우 비슷한 경향을 보여주었다. 다만, BEIS2의 배출량에 대한 CORINAIR 산출방법에 의한 배출량의 상대적인 차이가 대전(33%), 인천(25%), 경기(13%), 강원(-14%) 및 충남(21%) 등 일부 지역에서 비교적 높게 나타나 향후 이에 대한 추가분석 및 방법론의 보완이 필요하다고 판단된다.

3) 시간별 배출량의 경우에도 두 자료가 비교적 유사한 분포를 나타냈지만, 다른 물질에 비하여 이소프

렌의 차이가 좀 더 크게 나타났으며, 특히 3, 7, 8월 및 11월에 차이가 크게 나타났다.

4) 배출량 공간분포(시도별)와 시간분포(월별)에서 일부 차이가 나지만, 배출계수,엽생체량, 식생면적분포, 기온 및 PAR 등 배출량 산정에 이용되는 기초자료의 불확실성을 현재 수준에서는 평가하기 어려웠던 연구에서 나타난 두 배출량 자료의 차이가 통계적으로 유의한지는 검토할 수 없었다.

BEIS2와 CORINAIR 산출방법은 기상인자 보정방식이 다름에도 불구하고 매우 유사한 배출량 산정결과를 보여주어, 배출량 작성목적에 따라 적절하게 활용할 수 있을 것으로 평가되었다. 즉 CORINAIR 산출방법은 연간(또는 월별) 시도별 배출량 산정에 이용하고, BEIS2 배출모형은 대기질 모델링 입력 자료와 같은 격자별 시간별 고해상도 배출자료 작성에 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대핵심환경기술개발사업”으로 지원 받은 과제임.

### 참 고 문 헌

강상준, 곽애경 (1998) 상대성장법에 의한 남한강 유역 삼림의 생산량 및 생산성 비교, 임산에너지, 17(1), 8-22.

경기도 (2000) 21C 경기대기보전실천계획.

국립환경연구원 (2002) 대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구 중간보고서.

국립환경연구원 (2003) 대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구 중간보고서.

국립환경연구원 (2004) 대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구 중간보고서.

국립환경연구원 (2004) 대기보전정책수립지원시스템 4차년도 사업 최종보고서-[2. 배출량분석].

인천시 (1999) 대기환경 규제지역 지정에 따른 실천계획 수립연구 최종보고서.

조규탁, 장영기, 김조천, 김동영, 조역수 (2001) BEIS2를 이용한 수도권 및 강원지역의 Biogenic VOCs 배출량

추정, 한국대기환경학회 2001년 추계 학술대회.

EEA (1999) EMEP/CORINAIR CORINAIR Emission Inventory Guidebook, Group 11, 3rd ed.

EIIP Area Source Committee (1996) Biogenic Sources Preferred Methods, EIIP Vol. 5, Radian Corporation, Research Triangle Park, NC.

Geron, C.D., A.B. Guenther, and T.E. Pierce (1994) An improved model for estimating emissions of volatile organic compounds from forests in the eastern United States, J. Geophys. Res., 99 (D6), 12773-12791.

Guenther, A., C.N. Hewitt, D. Erickson, R. Fall and C. Beron (1995b) A global model of natural volatile organic compound emissions. J. Geophys. Res., 98, 12609-12617.

Guenther, A., N. 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.R. Zimmerman (1995a) A global model of natural volatile organic compound emissions. J. Geophys. Res., 100, 8873-8892.

Guenther, A.B. (1991) Isoprene and Monoterpene Emission Rate Variability : Observations With Eucalyptus and Emission Rate Algorithm Development, J. Geophys. Res., 96 (D6), 10799-10808.

Guenther, A.B., P.R. Zimmerman, P.C. Harley, R.K. Monson, and R. Fall (1993) Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses, J. Geophys. Res., 98, 12609-12617.

Iqbal, M. (1983) An introduction to solar radiation, Academic Press, New York, 202-210.

Steiner, A., C. Luo, Y. Huang, and W.L. Chameides (2002) Past and present-day biogenic volatile organic compound emissions in East Asia, Atmos. Environ., 36, 4895-4905.

USEPA (1995) Biogenic Emission Inventory System version 2 (BEIS2) User's guide, EPA contract No. 68-D3-0034.

USEPA (1997) Urban Airshed Model (UAM) Biogenic Emission Inventory System Version 2 (BEIS2) User's Guide.

Vukovich, J.M. and T. Pierce (2002) The Implementation of BEIS3 within the SMOKE modeling framework, USEPA 11st International Emission Inventory Conference.

