

ORIGINAL ARTICLE

## 제주지역 BVOCs의 배출량 산정에 관한 연구(1)

이기호 · 김형철<sup>1)</sup> · 허철구\*

제주대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>제주특별자치도 보건환경연구원

## A Study on the Estimation of BVOCs Emission in Jeju Island (1)

Ki-Ho Lee, Hyeong-Cheol Kim<sup>1)</sup>, Chul-Goo Hu\*

Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

<sup>1)</sup>Institute of Health and Environment, Jeju Special Self-governing Province, Jeju 690-856, Korea

### Abstract

This study was carried out to estimate the BVOCs emissions with the emission factors which reflected the native conditions of forests in Jeju Island. This study made effective use of the previous data for the weather data and the emission rate of each organic volatile component measured at 10 species of conifers and broad leaved trees. The CORINAIR method and the grid system of 1km×1km for whole area of Jeju Island were adopted in calculating the BVOCs emission emitted from forest. The vegetation information for Jeju Island was referred to GIS and a government report. By the results of BVOCs emission for Jeju Island, the 85% of monoterpene emission was emitted from conifers and the others was from broad leaved trees. Most of monoterpene emission was attributed to *Pinus thunbergii* and *Cryptomeria japonica*. The broad leaved trees greatly contributed to the isoprene emission and *Quercus serrata* played a dominant role in emission of isoprene. The total amount of BVOCs emission was estimated as 3612 ton yr<sup>-1</sup> in Jeju Island. The 51.1% of total emission was contributed to conifers, the 44.9% to broad leaved trees, and the 4.0% to grassland. Of total emission of BVOCs, monoterpene accounted for 32.3%, isoprene for 28.0%, and OVOCs for 39.7%. The BVOCs emission estimated by this study was less than that estimated by other previous study. This means that it is important to survey the emission rate at native conditions and gather the detailed information for various species of vegetation on target region.

**Key words** : BVOCs, Jeju Island, Conifers, Broad leaved tree, Monoterpene, Isoprene

### 1. 서론

NVOCs (natural volatile organic compounds)의 배출에 대해서는 1970년대부터 알려지기 시작했는데, 나무, 초지와 같은 식물로부터 모노테르펜류, 이소프렌과 같은 화합물이 배출되고 있으며, 이들은 광화학 반응성이 아주 크다는 사실이 밝혀지면서 그 중요성이 인식되기 시작했다(Dimitriadis, 1981).

NVOCs 중 식물에서 배출되는 VOCs를 총칭하여 BVOCs (biogenic volatile organic compounds)라고 한다. 반응성이 큰 탄소의 배출원이라는 점에서 중요한 의미를 지닌다(Kesselmeier 등, 2000). 식생에서 배출되는 양은 820 Tg-C/yr로 NVOCs의 71%를 차지하는 것으로 알려져 있다(Guenther 등, 1995). 국내에서 BVOCs의 배출량은 총 431,000 톤/년으로 AVOCs(anthropogenic volatile organic compounds)의 배출량(723,000 톤/년)

Received 13 October, 2014; Revised 15 December, 2014;

Accepted 16 December, 2014

\*Corresponding author : Chul-Goo Hu, Dept. of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Phone: +82-64-754-3443

E-mail: huchulgo@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 약 60% 정도가 배출되는 것으로 추정하고 있다 (NIER, 2005). 그렇지만 국내에서의 배출량 산정작업에서는 모든 수종에 있어 미국 EPA에서 제공하는 배출계수를 그대로 적용하였으며, 수종별 생체량 자료들도 대부분 외국의 자료에 의존하였다. 이처럼 우리나라의 실제적인 생육환경여건이 반영된 배출계수가 아닌 외국의 자료들을 적용하여 BVOCs 배출을 산정함으로써 우리의 현실에 대한 정확한 평가를 하는데 한계가 있게 된다(Choi, 2004; Kim, 2003; Kim, 2011; Park, 2008). 그러므로 BVOCs의 배출량을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 지역에 분포하고 있는 식생종류별로 배출속도 및 엽생체량 등에 대한 정확한 자료를 얻는 것이 필요하다.

특히 제주도는 육지의 도시지역과는 달리 AVOCs의 배출량은 적지만 산림이 풍부하여 산림 식생에서 배출되는 BVOCs는 상대적으로 많이 배출될 것으로 예상된다. 따라서 대기 중 VOCs의 농도가 인위적인 배출에 의해서 영향을 절대적으로 받는 대도시 지역과는 달리 제주지역의 대기환경에서는 BVOCs의 배출이 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 그렇지만 아직까지 제주지역에서는 BVOCs의 배출특성에 관한 직접적인 연구가 미흡할 뿐 아니라 우리 실정에 맞는 수종별 VOCs 배출계수의 개발 및 배출량 산정도 서둘러야 할 필요가 있다. 그리고 우리의 현실 여건이 잘 반영된 BVOCs 배출량을 산정하고 이를 근거로 국가 및 지역의 오존생성에의 영향 등을 해석할 필요가 있다.

이를 위해 선행 연구에서는 제주지역에서 우점을 차지하는 주요 수종을 대상으로 BVOCs의 주요 성분인 모노테르펜과 이소프렌의 배출속도를 직접 측정하여 제주지역에서 수종별 BVOCs의 배출 특성을 파악한 바 있다 (Kim과 Lee, 2010, 2012). 이 연구자료를 바탕으로 본 연구에서는 지역여건이 반영된 배출계수를 근거로 제주지역 전체 산림에 의한 BVOCs 배출량을 산정하고 그 배출특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 제주의 식생정보

제주지역의 산림식생에 관한 정보는 산림청에서 제공하는 산림기본통계와 수치임상도에서 얻을 수 있다. 산림청에서 10년에 1회 정도로 항공사진을 이용하여 임상

도를 작성하고 있으며 그 자료는 산림기본통계에도 이용되고 있다. 산림기본통계를 보면, 제주도 산림면적은 제주 전체면적의 48.3%인 892.8 ha로서 이는 전 국토 산림면적의 1.4%에 상당한다(KFS, 2008). 제주지역에서 침엽수림은 산림면적 대비 26.9%로서 우리나라 전체의 평균 42.0%보다 적고 활엽수림은 33.4%로서 우리나라 전체 26.0%보다 큰 것으로 나타나 제주도의 임상구조는 전국적인 임상구조와는 달리 활엽수림이 차지하는 비율이 높게 나타나고 있다. 그렇지만 산림청에서는 전국을 대상으로 산림자원을 파악하게 되므로 수종별 자료도 침엽수에 대해서 5 부류(소나무, 리기다소나무, 잣나무, 낙엽송, 기타침엽수림) 그리고 활엽수에 대해서 4 부류(밤나무, 포플러, 기타활엽수림, 활엽수 인공림)로 분류하여 정보를 제공하고 있다. 산림청에서 제공되는 격자별 수치임상도에서의 수종 분류도 일부 수종에 한정되어 있고 대부분 침엽수, 활엽수, 침활혼효림 등 군락으로 분류되어 수종별 해상도가 낮다. 따라서 특정한 지역의 주요 우점수종에 대한 정보는 제공되지 못하고 풀이 되고 있다. 즉 구상나무와 같은 제주의 주요 수종에 대한 정보를 얻을 수가 없다.

그러므로 제주지역에서의 주요 수종에 관한 정보를 얻기 위해 먼저 GIS에 나타난 침엽수의 수종별 분포자료를 분석하여 Table 1에 나타냈다. 표에서 보면 침엽수는 곰솔(*Pinus thunbergii*) 46%, 삼나무(*Cryptomeria japonica*) 15.4%, 소나무(*Pinus densiflora*) 4.7%, 구상나무(*Abies koreana*) 2.0%, 리기다소나무(*Pinus rigida*) 1.1%, 편백나무(*Chamaecyparis obtusa*) 0.4%, 비자나무(*Torreya ucifera*) 0.2%, 잣나무(*Pinus koraiensis*) 0.2% 순으로 분포하는 것을 알 수 있다. 반면, 전국 규모의 침엽수 분포는 소나무(55.4%), 낙엽송(17.3%), 리기다소나무(15.4%), 잣나무(8.6%)순으로 나타났다. 이로써 침엽수의 수종분포에 있어서 제주지역은 전국적인 상황과는 크게 차이를 알 수 있다.

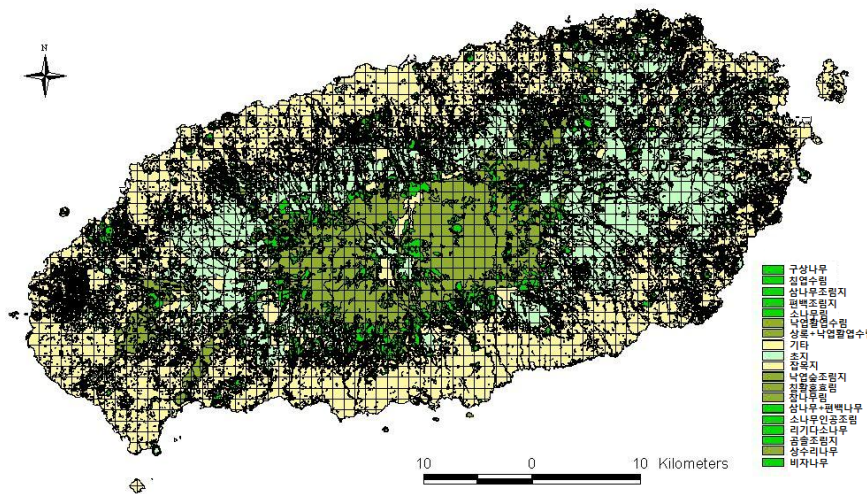
제주지역의 활엽수에 관한 정보는 GIS에서도 낙엽활엽수림, 참나무림, 상수리나무림으로만 간략히 구분되어 있는 실정이다. 그러므로 제주지역의 활엽수에 대해서 세밀하게 조사된 정보는 현재로서는 국립산림과학원에서 1994년 발간한 활엽수자원조사보고서(제주도 기본계획구)가 유일하며, 그 자료를 정리하여 Table 1에 나타냈다(Jeju-do, 2008; KFRI, 1994). 표에서 보면, 제주지

**Table 1.** Classification of species for conifers and broad leaved trees in Jeju area used in this study

Conifers <sup>1)</sup>			Non-conifers <sup>2)</sup>		
Species	Area (ha)	Ratio (%)	species	Area (ha)	Ratio (%)
<i>Pinus thunbergii</i>	10,804	46.0	<i>Carpinus laxiflora</i>	11,435	31.3
<i>Cryptomeria japonica</i>	3,629	15.4	<i>Quercus serrata</i>	5,825	16.0
<i>Pinus densiflora</i>	1,097	4.7	<i>Quercus crispula</i>	4,274	11.7
<i>Abies koreana</i>	468	2.0	<i>Styrax japonicus</i>	2,985	8.2
<i>Pinus rigida</i>	258	1.1	<i>Quercus acutissima</i>	1,806	4.9
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	90	0.4	<i>Quercus myrsinaefolia</i>	1,471	4.0
<i>Torreya uclifera</i>	43	0.2	<i>Castanopsis sieboldii</i>	1,465	4.0
<i>Pinus koraiensis</i>	39	0.2	<i>Prunus sargentii</i>	1,161	3.2
Other conifer trees	7,068	30.0	<i>Acer palmatum</i>	1,050	2.9
			<i>Celtis sinensis</i>	652	1.8
			Others	4,380	12.0
<b>Total</b>	<b>23,496</b>	<b>100.0</b>	<b>Total</b>	<b>36,505</b>	<b>100.0</b>

<sup>1)</sup> Data based on GIS (Jeju-do, 2008)

<sup>2)</sup> Data quoted from KFRI (1994)



**Fig. 1.** Distribution of vegetation and grid system.

역 활엽수 중에 서어나무(*Carpinus laxiflora*)가 17,800 ha(35.6%), 졸참나무(*Quercus serrata*) 9.0 ha(18.1%), 물참나무(*Quercus crispula*) 6.6 ha(13.3%), 때죽나무(*Styrax japonicus*) 4.6 ha(9.3%), 상수리나무(*Quercus acutissima*) 2.8 ha(5.6%), 가시나무(*Quercus myrsinaefolia*) 2.3 ha(4.6%) 순으로 식생 분포를 보이는 반면에 전국적으로는 상수리나무(22.8%), 신갈나무(18.9%), 굴참나

무(18.6%), 졸참나무(14.0%), 아까시나무 (5.9%), 갈참나무(5.0%), 오리나무(4.3%) 순으로 분포한다. 따라서 제주지역은 침엽수와 마찬가지로 활엽수에서도 전국적인 수종분포와는 차이를 볼 수 있다.

Fig. 1에 제주의 임상 분포를 1 km×1 km 격자로 나타냈다. 그림에서 보면, 제주도는 해발 1200 m~1500 m 지역에는 구상나무, 곰솔 등 한대침엽수림이 분포하고

1500 m 이상에서는 관목림과 구상나무가 주로 분포한다. 제주도 전체면적의 32% 정도를 차지하는 중산간 지역(해발 200 m~600 m 지역)은 면적의 45% 정도는 초지로 그리고 약 27% 정도는 산림으로 구성되어 있다. 이 중산간 지역은 활엽수와 침엽수가 비슷한 면적으로 분포하고 있다. 저지대에는 대부분 농경지로 이루어져 있다. 그리고 제주도 전반적으로 보면 활엽수는 대부분이 고도 700 m~1200 m에 분포하고 있으며, 곰솔 등 대다수 침엽수는 해발 600 m 이내에 분포하고 있다. 이처럼 제주도는 한라산을 중심으로 고도별 방향별(지역별)로 독특한 수종분포를 보이고 있다.

### 3. 연구방법

#### 3.1. BVOCs 측정 대상 수목의 선정

앞 절에서 본 바와 같이 육지지역과 아주 다른 식생 분포를 보이는 제주의 식생 특성을 고려하여 Kim과 Lee(2010, 2012)는 침엽수와 활엽수 중에서 식생면적이 넓은 우점 수종을 중심으로 각각 5 종씩(침엽수: 곰솔, 삼나무, 구상나무, 편백나무, 소나무; 활엽수: 졸참나무, 서어나무, 때죽나무, 상수리나무, 물참나무) 선정하여 BVOCs의 배출속도를 실측하였다. 수종별 BVOCs 배출계수를 산정하기 위한 배출속도를 모든 수종을 대상으로 실측하는 것은 물리적으로 불가능 할 뿐만 아니라 심도 있는 연구를 수행하기도 어렵다. 산림기본통계에 의하면, 제주지역에서 침엽수의 수령은 약 3.8령, 활엽수는 약 4.5령 정도로서 활엽수의 수령이 다소 높은 것으로 나타났다(KFS, 2008). 따라서 조사대상 수목은 대표적인 수목이면서 4령인 수종을 중심으로 선정하였다. 수목 선정과 BVOCs 채취 및 분석에 관한 사항은 이전 연구에 자세히 언급되어 있다(Kim, 2013; Kim과 Lee, 2010, 2012).

#### 3.2. BVOCs 배출량 산정방법

특정 지역의 산림에 대한 BVOCs 배출량을 정확하게 산정하기 위해서는 수종별 배출속도의 파악뿐 아니라 수종별 면적이나 잎 밀도에 대한 정보도 필수적이다. 그동안 국내에서의 BVOCs 배출량 추정작업에서는 미국의 BEIS 모델을 널리 이용하였다(Kim 등, 2008; Kim 등, 2010). 그런데 BEIS 모델에서 적용하고 있는 식생정보

들은 토양, 기후 등의 생육환경이 우리나라와 차이가 있는 곳에서 얻어진 자료일 뿐만 아니라 식생분류 또한 종(species) 기준이 아닌 속(genus) 기준으로 분류하고 있어 종 기준으로 확보된 배출속도를 직접 적용하는데 어려움이 있다. 그리고 실측된 수종별 배출속도가 BEIS에서 제공하는 배출속도와는 많은 차이를 보이는 수종들도 있는 것으로 보고되고 있다(NIER, 2005). 그러므로 보다 정확한 BVOCs 배출량을 산정을 위해서는 BEIS 배출계수를 그대로 적용하는 것은 적합하지가 않아 이에 대한 개선이 필요하다.

이에 본 연구에서는 제주도에 많이 분포하고 있는 수종들에서 실측한 BVOCs 배출속도 자료를 쉽게 적용할 수 있는 CORINAIR 방식을 채택하여 BVOCs 배출량을 산정하였다(EEA, 2002). CORINAIR 방식에 의한 BVOCs 배출량 산정에 있어서 필요한 환경보정계수를 산출하기 위한 PAR (photosynthetically active radiation) 과 잎온도( $T_{leaf}$ )는 현장에서 직접 측정된 값을 사용하였다. 그리고 선정된 10 종의 수목에 대한 배출속도는 직접 측정된 값을 이용하였으며, 환경보정계수 등의 산출을 위해 필요한 평균기온 및 일조시간 등은 제주 전역에 분포해 있는 AWS (automatic weather system) 20 개소와 ASOS (automatic surface observation system) 4 개소의 자료를 이용하였다.

그 외 필요한 잎 생체량 자료는 국립환경과학원에서 실측하여 산정한 생체량 정보를 사용하였다(NIER, 2005). 활엽수의 경우 대표수종인 졸참나무의 생체량 정보를 서어나무와 때죽나무에도 동일하게 적용하였다. 또한 침엽수인 경우 국내 대표 수종인 소나무와 삼나무의 생체량 정보는 BEIS에서 제공하는 정보를 그대로 적용하였고, 구상나무는 유사한 속의 전나무 자료를 적용하였다. 국내에 정보가 없는 수종에 대해서는 미국 등에서 적용하고 있는 유사 수종에 대한 생체량 정보를 사용하였다.

국립환경과학원(NIER, 2005)에서는 전국을 대상으로 산림청 수치임상도의 침엽수, 활엽수, 혼합림 등 16종(단일수종은 8종) 그리고 30×30 km의 격자에 대해 BEIS 배출계수를 그대로 적용하여 BVOCs 배출량을 산정한 바 있는데, 이러한 산정방법은 격자 해상도가 너무 낮을 뿐 아니라 종의 분류체계 또한 제주도의 식생상태가 제대로 반영되지 않으므로 수종 선정에도 한계가 있

어 제주도에 그대로 적용하기에는 무리가 많다. 그리고 비교적 규모는 작지만 고도별 식생분포가 독특한 제주의 지역적 특성을 가능한 구체적으로 반영하기 위해 제주도 전체를 1 km×1 km 격자로 세분화하여 격자별 BVOCs 배출량을 산정하였다.

GIS의 격자별 임상 정보에는 곰솔, 구상나무, 삼나무 등 주요 수종을 포함한 상당수의 침엽수 수종이 잘 구분되어 있어 해상도가 아주 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 GIS 자료를 바탕으로 침엽수에 대해 8 수종과 ‘기타 침엽수림’으로 분류하여 적용하였다. 그렇지만 활엽수에 대한 GIS 자료는 군락수준으로 수종 분류가 되어 있어 이를 직접 이용하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 제주도를 대상으로 조사한 활엽수자원조사보고서에 나타난 활엽수 69종에 대한 수종별, 시군별, 표고별 면적 자료를 활용하였다(KFRI, 1994). 이 조사보고서에는 임상 자료가 표고별 5 단계(0~300, 300~600, 600~900, 900~1200, 1200~1950 m) 그리고 시군별(2006년 이전의 제주도 행정구역인 4개 시·군)로 제시되어 있다. 이러한 활엽수 분포에 관한 정보를 침엽수의 격자체계와 일치시키기 위해 구글어스의 위·경도 자료를 토대로 등고선 및 시·군 경계의 위치를 정하여 침엽수에서 제시한 세부 격자 체계로 전환하였다.

BVOCs 배출량 산정에서 고려된 침엽수(8 수종과 기

타 침엽수림) 중의 5 수종(곰솔, 삼나무, 소나무, 구상나무, 편백나무)과 활엽수 69 수종 중 5 수종(서어나무, 졸참나무, 물참나무, 때죽나무, 상수리나무)에 대해서는 선행 연구에서 이미 BVOCs의 배출속도가 실측되어 있다(Kim과 Lee, 2010, 2012). 이들 10 수종은 제주도에 분포하는 산림 면적의 약 78%를 차지하고 있다. 나머지 침엽수 및 활엽수 수종(60 여종)에 대해서는 비용이나 기간 등의 문제 그리고 기존 배출량 산정자료와의 비교를 위해 유사수종에 대한 BEIS 배출계수를 그대로 적용하였다.

그리고 침엽수 및 활엽수에서 명확한 수종 구분이 되지 않는 낙엽활엽수, 상록 및 낙엽활엽수 혼효림, 침엽수 및 활엽수 혼효림에 대해서는 각각 낙엽활엽수, 상록 및 낙엽활엽수, 침엽수 및 활엽수 중에서 면적가중 평균배출계수로 환산하여 적용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 수종별 BVOCs 배출계수

Table 2에 주요 수목별 BVOCs 배출량을 추정하는데 사용된 잎 생체량 자료에 대해 국내자료와 미국 EPA 자료를 비교하여 제시하였다. Table 2에서 보면 국내에서 측정된 소나무의 잎 생체량 자료는 변동이 심한 것을 볼

Table 2. Leaf mass density used in this study

Species	Site	Leaf mass density (g-dw m <sup>-2</sup> )				U.S.EPA
		Spring	Summer	Fall	Winter	
<i>Pinus densiflora</i>	Gumsung Mt. <sup>1)</sup>	825	662	1542	-	(700) <sup>3)</sup>
<i>Pinus thunbergii</i>	-	-	-	-	-	(700) <sup>3)</sup>
<i>Abies koreana</i>	-	-	-	-	-	(1500) <sup>3)</sup>
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	-	-	-	-	-	(1500) <sup>3)</sup>
<i>Cryptomeria japonica</i>	-	-	-	-	-	(1500) <sup>3)</sup>
<i>Quercus serrata</i>	Gumsung Mt. <sup>1)</sup>	(337)	(419)	(307)	-	375 <sup>3)</sup>
<i>Styrax japonicus</i> <sup>2)</sup>		(337)	(419)	(307)	-	375 <sup>3)</sup>
<i>Quercus crispula</i> <sup>2)</sup>		(337)	(419)	(307)	-	375 <sup>3)</sup>
<i>Carpinus laxiflora</i> <sup>2)</sup>		(337)	(419)	(307)	-	375 <sup>3)</sup>
<i>Quercus acutissima</i>	Gumsung Mt. <sup>1)</sup>	(265)	(428)	(408)	-	375 <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> NIER (2005)

<sup>2)</sup> Data equal to the leaf mass density of *Quercus serrata*

<sup>3)</sup> Guenther, 1994

( ) Leaf mass density used in this study

수 있다. 따라서 본 연구에서는 침엽수 중에서 곰솔과 삼나무는 Guenther 등(1994)이 제시한 값을 사용하였고, 구상나무에 대해서는 Guenther 등(1994)이 제시한 동일 속(genus)인 전나무의 잎 생체량을 적용하였다. 활엽수의 졸참나무와 상수리나무에 대해서는 국립환경연구원이 실측한 자료를 그대로 사용하였는데, 이는 미국의 잎 생체량 자료와 비슷한 수준을 나타냈다(NIER, 2005). 국내에 잎 생체 정보가 없는 때죽나무와 서어나무는 졸참나무의 잎 생체량을 동일하게 사용하였으며 BEIS2에서 활엽수의 잎 밀도(375 leaf-g/m<sup>2</sup>)들과 비슷한 잎 생체량을 보였다.

본 연구에서 고려한 침엽수 수종에 대한 BVOCs 성분별 배출계수를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보면 침엽수에 있어서는 monoterpene이 isoprene이나 OVOCs (other VOCs)보다 월등히 높은 배출계수를 보이는데, 이러한 경향은 다른 연구에서도 비슷한 결과를 나타냈다(NIER, 2005). Table 3에서 침엽수 수종별 monoterpene 배출계수를 보면, 구상나무가 가장 큰 값을 보였으며 다음으로 리기다소나무, 잣나무, 삼나무, 비자나무, 소나무, 곰솔, 편백 순으로 나타났다. 침엽수 수종별 isoprene 배출계수를 보면 비자나무, 구상나무, 삼나무, 편백나무, 소나무, 곰솔, 리기다, 잣나무 순으로 나타나 monoterpene과는 수종별 패턴이 다르게 나타났다. OVOCs는 구상나무와 편백나무에서 가장 큰 배출계수를 보였다. 활엽수에 대해서 보면, isoprene의 배출계수가 monoterpene이나 OVOCs보다 월등히 큰 배출계수를 보이는데, 이 또한 다른 연구결과와도 비슷한 경향을 나타내었다(NIER, 2005). 활엽수 수종별 isoprene 배출계수를 비교해 보면, 가시나무속인 가시나무(29.75 kg km<sup>-2</sup>hr<sup>-1</sup>)와 붉가시나무(29.75 kg km<sup>-2</sup>hr<sup>-1</sup>)가 높고, 참나무속에서도 신갈나무(29.75 kg km<sup>-2</sup>hr<sup>-1</sup>), 굴참나무(29.75 kg km<sup>-2</sup>hr<sup>-1</sup>), 그리고 졸참나무(24.0437 kg km<sup>-2</sup>hr<sup>-1</sup>)가 다른 활엽수들에 비해 월등히 높은 배출계수를 보였다.

본 연구에서 실측대상이 된 10 수종에 대한 실측 배출계수와 BEIS 배출계수를 비교하여 Fig. 2에 나타냈다. 본 연구의 실측 배출계수와 BEIS 배출계수는 수종마다 차이는 있으나, 침엽수의 isoprene을 제외하면 대부분의 수종에서 본 연구의 실측 배출계수보다 BEIS 배출계수가 크게 나타났다. 특히 활엽수의 상수리나무와 물참나

Table 3. Emission factors used in this study

Species	Emission factor (kg km <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup> )		
	Isoprene	Monoterpene	OVOCs
<i>Pinus thunbergii</i>	0.1820	1.1340	1.2950
<i>Cryptomeria japonica</i>	0.3863	2.0775	1.2950
<i>Pinus densiflora</i>	0.1890	1.2425	1.2950
<i>Abies koreana</i>	0.5100	2.9888	2.7750
<i>Pinus rigida</i> <sup>1)</sup>	0.0793	2.3800	1.2950
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.2065	0.3623	2.7750
<i>Torreya nucifera</i> <sup>1)</sup>	0.7454	1.3666	0.9939
<i>Pinus koraiensis</i> <sup>1)</sup>	0.0793	2.3800	1.2950
Other conifer trees <sup>1)</sup>	0.7454	1.3666	0.9939
<i>Carpinus laxiflora</i>	0.3133	0.1211	0.6937
<i>Quercus serrata</i>	24.0437	0.0710	0.6937
<i>Quercus crispula</i>	5.1558	0.1053	0.6937
<i>Styrax japonicus</i>	2.0695	0.0737	0.8718
<i>Quercus acutissima</i>	0.5463	0.0859	0.6937
<i>Quercus myrsinaefolia</i> <sup>1)</sup>	29.7500	0.0850	0.6937
<i>Castanopsis sieboldii</i> <sup>1)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
<i>Prunus sargentii</i> <sup>1)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
<i>Acer palmatum</i> <sup>1)</sup>	0.0425	0.6800	0.6937
<i>Celtis sinensis</i> <sup>1)</sup>	0.0425	0.0850	0.6937

<sup>1)</sup>Emission factor quoted from CAPSS

무인 경우 BEIS 배출계수가 월등히 큰 값을 보였다. 이러한 결과들은 식물의 생육환경이 지역마다 많이 다르기 때문에 나타나는 것으로 보인다(NIER, 2005). 그러므로 특정 지역의 식물에서 배출되는 휘발성물질의 배출량은 그 지역의 생육 환경을 반영하기 때문에 실측을 통해 그 배출량을 산정하는 것이 정확도와 신뢰도를 높이는 측면에서 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Table 4에는 본 연구에 사용한 초지에 적용한 BVOCs 배출계수를 참고로 나타냈다. 초지의 BVOCs 배출계수는 BEIS 배출계수를 적용하였는데, 초지에 대한 monoterpene 배출계수가 isoprene과 OVOCs보다 약 2 배 정도 큰 값을 볼 수 있다. 제주지역에서 초지의 면적은 전체면적에서 27.3%(2008년 기준) 수준이지만 해마다 1.1% 정도가 줄어들고 있어 시간이 흐름에 따라 BVOCs 배출량도 약간씩 줄어들 것으로 예상된다.

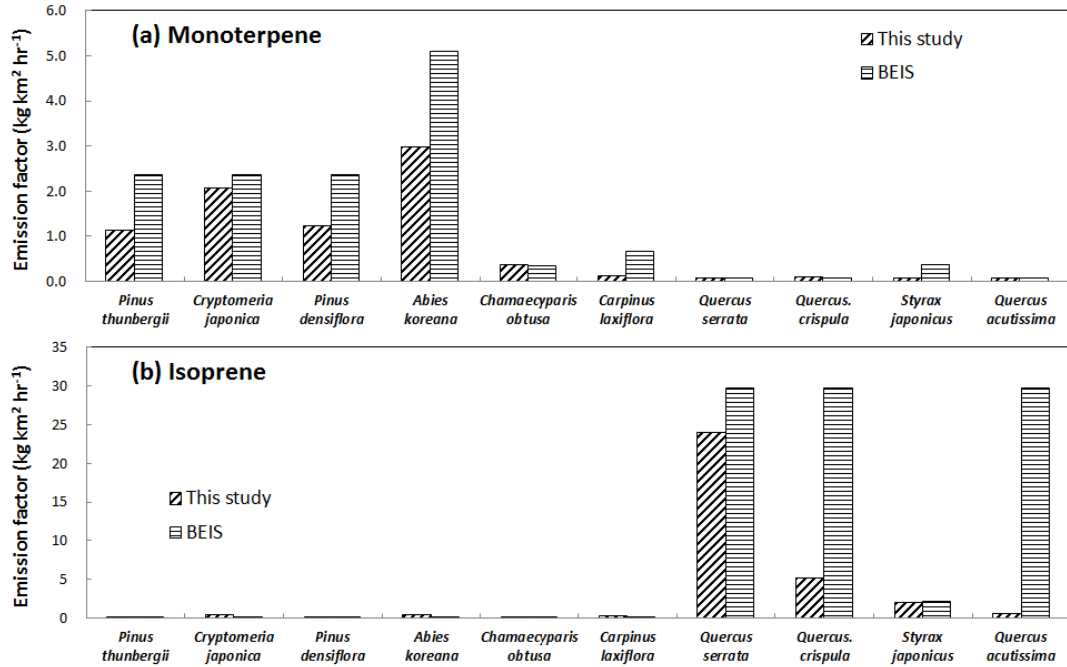


Fig. 2. Comparison of emission factors used in this study and quoted from BEIS.

Table 4. Emission factors for grassland used in this study

Species	Area (km <sup>2</sup> )	Emission factor (kg km <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup> )		
		Isoprene	Monoterpene	OVOcs
grassland	243.74	0.0562	0.1405	0.0843

4.2. BVOCs 배출량

가. 수종별 BVOCs 배출량

Fig. 3에는 monoterpene의 연간 배출량을 나타냈다. 침엽수 및 활엽수 전체에서 monoterpene 배출량이 가장 많은 수종은 식재 면적이 2 번째로 많은 곰솔로서 347 ton yr<sup>-1</sup>을 배출하는 것으로 나타났으며 다음으로 삼나무가 약 220 ton yr<sup>-1</sup> 규모로 배출하는 것으로 나타났다. 반면에 다른 수종들은 50 ton yr<sup>-1</sup> 미만의 배출량을 보였다. 결국 monoterpene의 경우 전체 수종에서 곰솔과 삼나무의 배출량이 가장 큰 몫을 차지함을 알 수 있다. 활엽수에서는 식재 면적이 가장 넓은 서어나무가 다른 활엽수 수종의 배출량보다 3 배 정도 많은 약 30 ton yr<sup>-1</sup> 정도로 배출하는 것으로 나타났으며 다음으로 졸참나무, 물참나무가 10 ton yr<sup>-1</sup> 이내의 배출량을 보였다. 전체적

인 monoterpene 배출량을 보면 침엽수에서 85%, 활엽수에서 15%가 배출하고, 수종 중에서는 곰솔이 46.7%, 삼나무가 29.6%로 총 76.3%의 점유율을 보였다.

Fig. 4에 isoprene의 연간 배출량을 나타냈다. 침엽수 및 활엽수 전체에서 isoprene 배출량이 가장 많은 수종은 졸참나무로서 전체 isoprene 배출량의 79.5%에 해당하는 567 ton yr<sup>-1</sup>을 배출하는 것으로 나타났으며 다음으로 물참나무가 전체의 8.7%인 62 ton yr<sup>-1</sup>으로 나타났다. 반면에 식재면적이 가장 넓은 서어나무는 전체의 1.8%인 13 ton yr<sup>-1</sup>만을 배출하는 것으로 나타났는데, 이는 이의 isoprene 배출계수가 다른 종에 비해 크게 작았기 때문이다. 침엽수에서는 곰솔이 전체의 1.8%인 10 ton yr<sup>-1</sup>, 삼나무는 전체의 1.0%인 7.0 ton yr<sup>-1</sup> 수준으로 나타났다. 결국 isoprene의 배출은 졸참나무가 주도하는

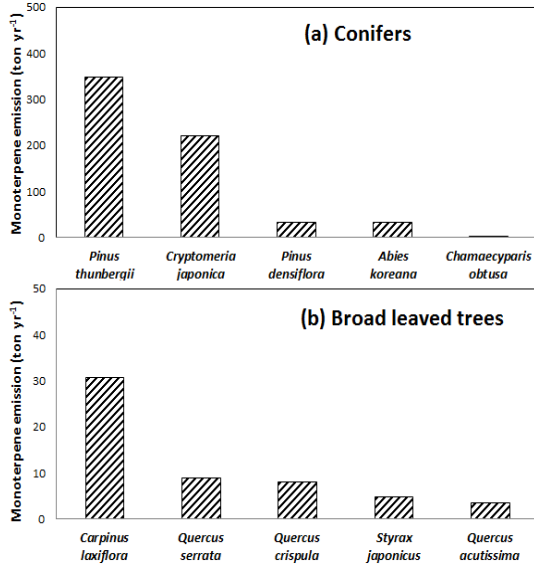


Fig. 3. Monoterpene emissions from conifers and broad leaved trees.

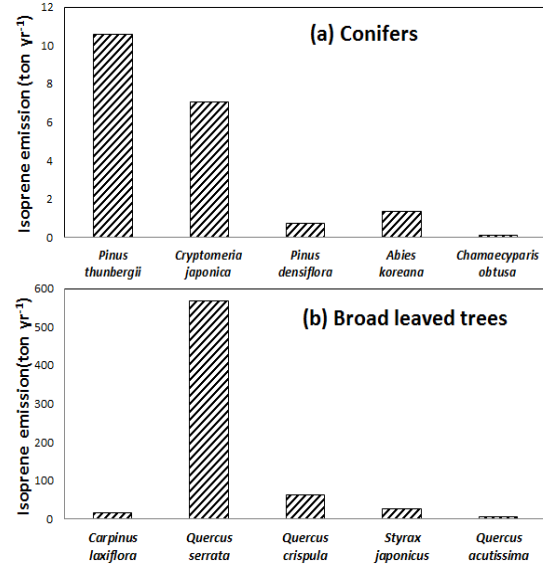


Fig. 4. Isoprene emissions from conifers and broad leaved trees.

Table 5. Emissions of BVOCs from conifers calculated in this study

Species	Isoprene		Monoterpene		OVOCs		Total	
	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)
<i>Pinus thunbergii</i>	10.596	21.4	347.335	35.9	390.041	47.0	747.972	40.5
<i>Cryptomeria japonica</i>	7.050	14.2	219.704	22.7	131.012	15.8	357.766	19.4
<i>Pinus densiflora</i>	0.725	1.5	32.820	3.4	33.606	4.0	67.151	3.6
<i>Abies koreana</i>	1.340	2.7	31.924	3.3	28.857	3.5	62.121	3.4
<i>Pinus rigida</i>	0.098	0.2	17.116	1.8	9.313	1.1	26.527	1.4
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.099	0.2	0.936	0.1	6.961	0.8	7.996	0.4
<i>Torreya nucifera</i>	0.203	0.4	2.256	0.2	1.641	0.2	4.100	0.2
<i>Pinus koraiensis</i>	0.015	0.0	2.588	0.3	1.408	0.2	4.011	0.2
Other conifer trees	29.348	59.3	312.208	32.3	227.06	27.4	568.616	30.8
Total	49.474	100.0	966.887	100.0	829.899	100.0	1846.26	100.0

것으로 파악되었다. 또한 전체 isoprene 배출에서 대해서는 활엽수가 94.4%, 그리고 침엽수가 5.6%를 기여하는 것을 알 수 있다.

제주지역의 침엽수 8 수종과 기타 침엽수림에 대한 수종별 BVOCs 배출량을 Table 5에 제시하였다. 제주도에 서 침엽수로부터 배출되는 BVOCs는 1846.2 ton yr<sup>-1</sup>로 산정되었다. 이 중에서도 가장 넓은 분포를 지닌 곰솔이 전체 배출량에서 40.5%인 747.972 ton yr<sup>-1</sup>을 배출하여

최대의 점유율을 보였으며, 다음으로 삼나무가 19.4%인 357.766 ton yr<sup>-1</sup>을 나타냈다. 본 연구의 실측 대상 침엽수 5 수종(곰솔, 삼나무, 소나무, 구상나무, 편백나무)에 서의 BVOCs 배출이 침엽수 전체의 67.4%를 점유하였다. 주요 5 수종을 제외하면 BVOCs 배출량은 603.6 ton yr<sup>-1</sup>으로 전체 침엽수의 32.7%에 해당되었지만 수종분 류가 되지 않은 ‘기타 침엽수림’(30.8%)을 제외한 3 수 종의 배출량은 1.8%인 34.638 ton yr<sup>-1</sup>으로 미미한 수준



이었다. 곰솔과 삼나무에서 배출되는 monoterpene과 OVOCs의 배출량 점유율은 각각 58.6%, 62.8%로 크지만 isoprene 배출량에서는 상대적으로 낮은 35.6%의 점유율을 보였으며, 기타 침엽수림에서는 isoprene 배출 점유율이 59.3%로 증가하는 양상을 보였다. 앞으로 기타 침엽수림으로 분류된 수목들에 대해서 보다 구체적으로 수종을 확인하여 분류한다면 침엽수 BVOCs 배출량에 대한 해상도를 더욱 높일 수 있을 것으로 생각된다.

제주지역 전체 산림에서 활엽수의 수종별 BVOCs 배출량을 Table 6에 나타냈다. 활엽수 69 종에 대한 BVOCs 배출량은 1620.3 ton yr<sup>-1</sup>으로 산정되었으며, 이 중에서 가장 넓은 지역에 분포해 있는 서어나무가 전체 배출량의 12.9%인 209 ton yr<sup>-1</sup>인 반면, 졸참나무는 659 ton yr<sup>-1</sup>(40.6%)을 배출하여 가장 큰 점유율을 보였고, 다음으로 식재 면적이 6 번째인 가시나무가 273 ton yr<sup>-1</sup>(16.9%)를 배출하는 것으로 나타났다. 그리고 본 연구에서 실측대상 활엽수 5 수종(서어나무, 졸참나무, 물참나무, 패죽나무, 상수리나무)의 BVOCs 배출량은 1,104 ton yr<sup>-1</sup>으로서 제주지역 전체 활엽수에서의 BVOCs 배출량의 68.1% 수준이었고 나머지 활엽수 64 종에서의 배출량은 516 ton/year으로 전체 활엽수 배출량의 31.9%를 나타냈다. 활엽수에서의 BVOCs 배출은 참나무과에 속하는 졸참나무와 가시나무가 주도하는 것으로

나타났는데, 이는 참나무과 수종의 단위면적당 BVOCs 배출량이 다른 수종들보다 월등히 크기 때문이다(Kim, 2013). 이로써 64 종의 활엽수보다 주요 우점 수종들에 관한 배출계수 및 활동도에 관한 정확한 정보가 전체적인 BVOCs 배출량 파악에 중요한 인자가 될 수 있음을 볼 수 있다. 그리고 식재 면적에 따른 10 개 수종의 BVOCs 배출을 보면 전체 배출의 90.5%에 해당되는 것으로 파악되었다.

Fig. 5에는 침엽수와 활엽수 수종별 식재면적과 BVOCs 배출량을 나타냈다. 침엽수에 대해 전체적으로 보면 BVOCs (isoprene, monoterpene, OVOCs)의 배출은 식재면적에 대체적으로 비례하는 것으로 나타나지만 구상나무의 경우에는 예외였다. 그림에서 활엽수 수종별 식재면적과 BVOCs 배출량을 보면, 활엽수에서의 BVOCs 배출은 침엽수의 경우와는 달리 식재면적 순으로 나타나지 않았으며 졸참나무와 가시나무의 배출량이 큰 것으로 나타났다.

Table 7에는 제주지역의 침엽수와 활엽수 그리고 초지에서 배출되는 BVOCs 배출량을 나타냈다. 제주지역 산림(침엽수, 활엽수, 초지)에서 배출되는 BVOCs의 총량은 약 3,612.2 ton yr<sup>-1</sup>으로 산정되었다. 이 중에서 침엽수가 51.1%, 활엽수가 44.9% 그리고 초지가 4.0%를 배출하여 침엽수가 활엽수에 비해 다소 큰 기여를 나타냈

**Table 6.** Emissions of BVOCs from broad leaved trees calculated in this study

No	Species	Isoprene		Monoterpene		OVOCs		Total	
		Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)
1	<i>Carpinus laxiflora</i>	14.980	1.566	30.641	27.471	163.699	29.660	209.32	12.919
2	<i>Quercus serrata</i>	567.226	59.284	8.796	7.886	83.379	15.107	659.401	40.697
3	<i>Quercus crispula</i>	62.517	6.534	8.032	7.201	47.176	8.548	117.725	7.266
4	<i>Styrax japonicus</i>	25.420	2.657	4.799	4.302	53.702	9.730	83.921	5.179
5	<i>Quercus acutissima</i>	4.307	0.450	3.477	3.117	25.855	4.685	33.639	2.076
6	<i>Quercus myrsinaefolia</i>	238.154	24.891	3.879	3.478	31.661	5.737	273.694	16.892
7	<i>Castanopsis sieboldii</i>	0.339	0.035	1.933	1.733	31.544	5.715	33.816	2.087
8	<i>Prunus sargentii</i>	0.185	0.019	0.785	0.704	16.621	3.012	17.591	1.086
9	<i>Acer palmatum</i>	0.167	0.017	11.363	10.187	15.034	2.724	26.564	1.639
10	<i>Celtis sinensis</i>	0.104	0.011	0.881	0.790	9.326	1.690	10.311	0.636
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
69	<i>Robinia pseudoacacia</i>	0.009	0.001	0.001	0.001	0.006	0.001	0.016	0.001
	Total	956.8	100.0	111.5	100.00	551.9	100.0	1620.3	100.0

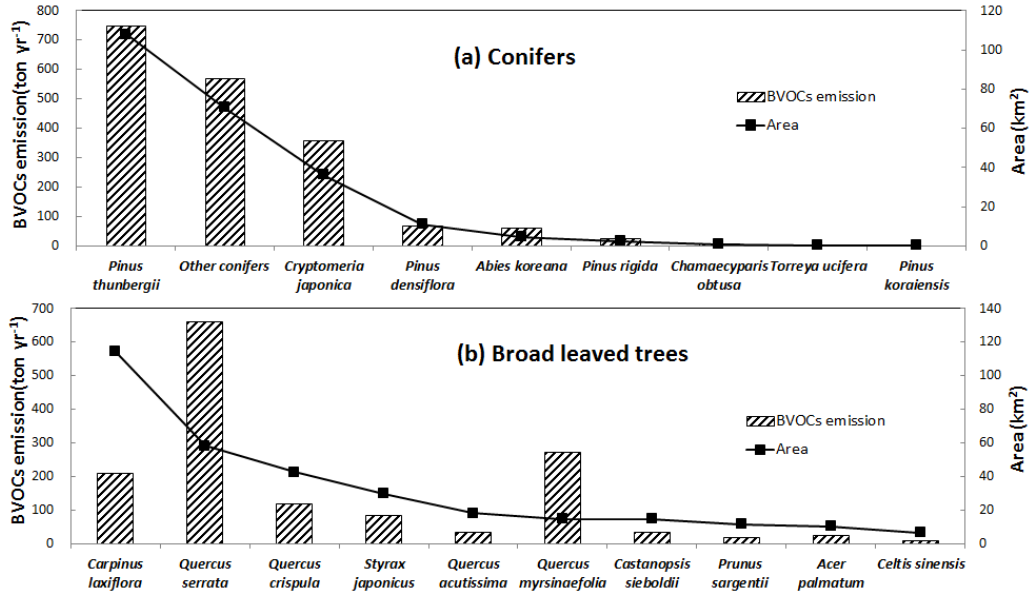


Fig. 5. BVOCs emission and cultivated area of each tree considered in this study.

Table 7. Emission of BVOCs according to forest type

Forest type	Isoprene		Monoterpene		OVOCs		Total	
	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)	Emission (ton yr <sup>-1</sup> )	Ratio (%)
Conifers	49.5	4.9	966.9	82.9	829.9	57.8	1,846.3	51.1
Broad leaved trees	956.8	94.5	111.5	9.6	551.9	38.5	1,620.3	44.9
Grassland	5.9	0.6	87.4	7.5	52.4	3.7	145.7	4.0
Total	1,012.2	100.0	1,165.8	100.0	1,434.2	100.0	3,612.2	100.0

다. 그리고 isoprene은 활엽수가 침엽수나 초지에 비해 절대적으로 많은 956.8 ton yr<sup>-1</sup>를 배출하는 반면, monoterpene은 침엽수가 상대적으로 많은 배출을 보였다. 그리고 OVOCs 배출량은 1,434.2 ton yr<sup>-1</sup>으로 침엽수 57.8%, 활엽수 38.5%, 초지 3.7%를 기여하는 것으로 나타남으로써 isoprene과 monoterpene과는 다른 수종별 비율을 보였다. 제주 전역에서 배출되는 BVOCs 성분별 비율을 보면 OVOCs가 39.7%로 가장 많고 다음으로 monoterpene이 32.3%, isoprene은 28.0%인 것으로 나타났다. 이처럼 isoprene보다 monoterpene의 배출이 다소 많은 것은 활엽수가 식재된 지역이 대부분 고도 700 m~1200 m인데 비해 대다수의 곰솔 등 침엽수는 주로 해발 600 m 이내에 분포하므로 고도에 따른 기온의

차이가 반영된 결과인 것으로 생각된다.

국내의 타 연구에서 BIES2 및 CORINAIR 방식에 따라 전국을 대상으로 산정된 BVOCs 배출량에서 제주 지역에 대해서는 각각 4,898 ton yr<sup>-1</sup>과 4.695 ton yr<sup>-1</sup>으로 보고된 바 있다(Cho 등, 2006). 이는 본 연구에서 산정한 BVOCs 배출량(3,612 ton yr<sup>-1</sup>)보다 각각 1,286 ton yr<sup>-1</sup>, 1,083 ton yr<sup>-1</sup>이 더 많이 산정되었음을 알 수 있다. 이러한 차이는 본 연구에서는 우점을 차지하는 수종(10 종)에 대해서 실측 BVOCs 배출계수를 적용하였으며, 비교적 세분화된 제주 산림의 임상분포를 반영하였을 뿐 아니라 배출 격자별 해상도를 크게 높였기 때문인 것으로 보인다. 이처럼 연구결과들에서의 차이를 극복하고 향후 CAPSS 등에서 실제로 적용하기 위해서는

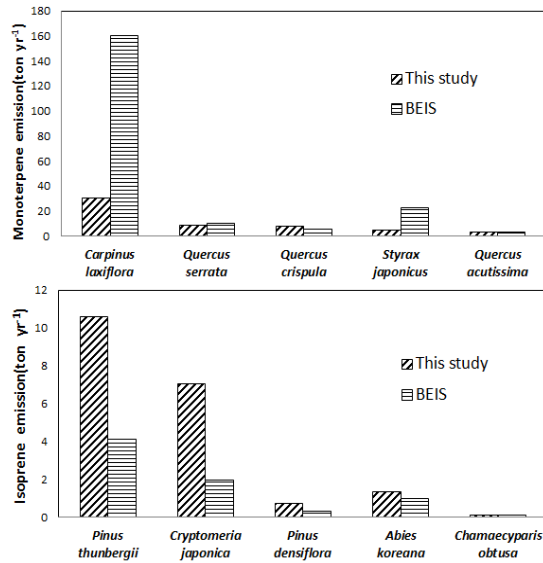


Fig. 6. Comparison of BVOCs emissions of this study and BEIS for conifers.

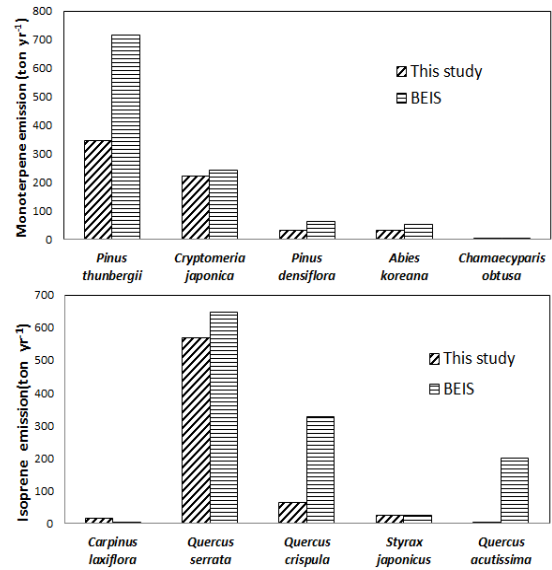


Fig. 7. Comparison of BVOCs emissions of this study and BEIS for broad leaved trees.

다양한 수종에 대한 배출속도의 현지 측정과 그 결과에 대한 면밀한 검토가 더욱 이루어져야 할 것이다.

나. BVOCs 배출량 비교

BVOCs 배출량을 산정함에 있어서 수종별 BVOCs 배출속도는 전체 BVOCs 배출량의 정확성에 큰 영향을 주는 중요한 인자중 하나이다. 그래서 Fig. 6에는 침엽수의 수종별 실측 배출계수와 BEIS 배출계수를 이용하여 산정된 BVOCs 배출량을 비교하여 나타냈다. 그림에서 보면, monoterpene 배출에서는 곰솔인 경우 BEIS 배출량(BEIS 배출계수에 의해 산정된 배출량)이 본 연구의 실측 배출량(실측 배출계수를 이용하여 산정된 배출량)보다 369 ton yr<sup>-1</sup>이나 많은 것으로 나타났다. 그리고 삼나무 등에서는 21~29 ton yr<sup>-1</sup> 정도의 차이를 보였다. Isoprene 배출에서는 monoterpene과 반대로 본 연구의 실측 배출량보다 BEIS 배출량이 1~6 ton yr<sup>-1</sup> 정도 적게 산정되었다. 결국 침엽수 전체적으로 보면, 본 연구의 실측 배출량보다 BEIS 배출량이 67%(428 ton yr<sup>-1</sup>)가 많이 산정되었다. 이와 같이 침엽수에서 활동도가 큰 곰솔이 전체 배출량의 차이를 주도하고 있으며 또한 소나무와 구상나무에서도 차이를 보이고 있기 때문에 전체적으로 본 연구의 실측 배출량보다 BEIS 배출량이 큰 것으로

평가되었다.

Fig. 7에 활엽수 수종별로 본 연구의 실측 배출량과 BEIS 배출량을 비교하여 제시하였다. Monoterpene 배출에서는 서어나무가 본 연구의 실측 배출량보다 BEIS 배출량이 무려 400%(130 ton yr<sup>-1</sup>)나 많은 차이를 보였다. Isoprene 배출에서는 특히 물참나무에서 264 ton yr<sup>-1</sup>, 상수리나무에서 196 ton yr<sup>-1</sup> 정도로 큰 차이를 나타냈다. 결국 활엽수에서는 물참나무, 상수리나무, 서어나무가 두 방식에 의한 배출량의 차이를 주도하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 8에 침엽수 및 활엽수 10 종에 대한 본 연구의 실측 배출량과 BEIS 배출량을 비교하여 제시하였다. 두 방식에 의한 배출량의 차이는 monoterpene 및 isoprene 모두에서 나타나고 있으며, 이중 monoterpene에서는 곰솔과 서어나무가, isoprene에서는 물참나무, 상수리나무, 졸참나무에서 그 차이가 큰 것으로 나타났다. 본 연구의 실측 배출량보다 BEIS 배출량이 침엽수에서는 428 ton yr<sup>-1</sup> 그리고 활엽수에서는 673 ton yr<sup>-1</sup>로써 총 1,101 ton yr<sup>-1</sup>이나 많은 것으로 평가되었다.

이와 같은 결과로 볼 때 본 연구에서 선정한 10 수종 외에도 다른 수종, 특히 활엽수 수종에 대한 보다 세밀한

지역의 식생 정보가 제공될 수 있다면 본 연구의 실측 배출량의 신뢰도는 더욱 커질 것으로 예상된다. 앞으로 보다 많은 수종에 대한 신뢰성 있는 배출속도의 측정과 세밀한 임상 정보가 필요하다고 판단된다.

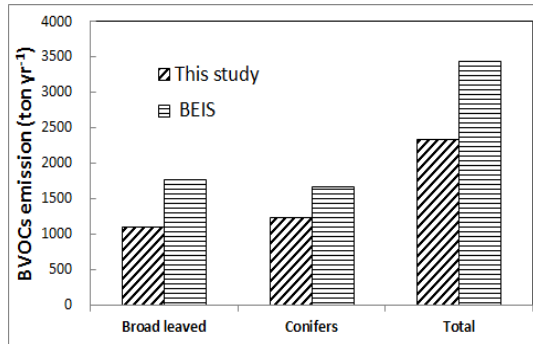


Fig. 8. BVOCs emissions of this study and BEIS estimated for 10 species considered.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내 전반적인 식생구조와 크게 다른 식생을 가진 제주도 지역의 특성이 고려된 지역 차원의 BVOCs의 배출량을 보다 엄밀하게 산정하고자, 기존에 이루어진 제주도의 우점 수종에 대한 실측 BVOCs 배출 속도 자료와 현지 기상측정 자료 등을 이용하여 CORINAIR 방식에 따른 배출량을 산정한 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1. 제주도처럼 지역은 좁지만 고도별 수종분포와 식생이 독특한 지리적 특성을 충분히 반영함으로써 BVOCs 배출량 산정의 정확도를 높이고자 제주도 전체를 1 km×1 km 격자로 세분화하고 각 격자별 식생분포와 기상자료 등을 적용하여 산정하였다.

2. 본 연구에서 고려한 10 종의 수종에 대한 BVOCs 배출계수를 보면 본 연구의 실측 배출계수보다 BEIS 배출계수가 큰 값으로 나타났는데, 이는 같은 종의 식물이라도 성장환경이 미국과 다르기 때문으로 판단된다.

3. 전체적인 monoterpene 배출량은 침엽수에서 85%, 활엽수에서 15%가 배출하고, 수종 중에서는 곰솔이 46.7%, 삼나무가 29.6%로 총 76.3%를 점유하였다. Isoprene은 활엽수가 94.4%, 그리고 침엽수가 5.6%를 배출하였으며 수종별로 졸참나무가 전체의 79.5%를 점

유하는 하는 것으로 나타났다.

4. 제주도에서 배출되는 전체 BVOCs 배출량은 총 3612.2 ton yr<sup>-1</sup>으로 산정되었는데, 이중 9 종의 침엽수가 51%, 69 종의 활엽수는 45%, 그리고 초지는 4%를 각각 배출하였다.

5. 본 연구의 실측 배출계수를 일부 수종에 적용하여 산정한 BVOCs 배출량은 BEIS 배출계수를 적용하여 산정한 이전의 배출량에 비해 적게 산정되었는데, 이는 제주의 임상분포 특성을 비교적 구체적이고 세밀하게 반영하였기 때문으로 판단된다.

그렇지만 제주의 주요 주종, 특히 활엽수종에 대한 수종분류 및 그에 따른 통계정보가 아직은 빈약하고, 이 지역의 수종에 대한 실측 생체량 정보 등도 크게 부족하여 이에 대한 연구가 더욱 필요하다고 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014학년도 제주대학교 학술연구진흥비 지원사업에 의하여 연구되었습니다.

#### References

- Cho, K.T., Kim, J.C., Hong, J.H., 2006, A study on the comparison of biogenic VOC (BVOC) emissions estimated by BEIS and CORINAIR methodologies, *J. Korean Society Atmospheric Environment*, 22(2), 167-177.
- Choi, B. H., 2004, A study of natural VOCs affection to the ozone production: Sensitivity analysis by Models -3/CMAQ, Master's Dissertation, Kangwon National Univ., Kangwon-do, Korea.
- Dimitriades, B., 1981, The role of natural organics in photochemical air pollution, *J. Air Pollution Control Association*, 31, 229-235.
- EEA (European Environment Agency), 2002, [http://www.eea.europa.eu/publications/technical\\_report\\_2001\\_3/group11.pdf/view](http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2001_3/group11.pdf/view)
- Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Genron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W. A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., Zimmerman, P., 1995, A global model of natural volatile organic compound emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, 8873-8892.

- Jeju-do (Jeju Special Self-Governing Province), 2008, <http://gis.jeju.go.kr/>
- Kesselmeier, J., Kuhn, U., Wolf, A., Andreae, M. O., Ciccioli, P., Brancaleoni, E., Frattoni, M., Guenther, A., Greenberg, J., Vasconcellos, P. D. C., Oliva, T., Tavares, T., Artaxo, P., 2000, Atmospheric volatile organic compounds (VOC) at a remote tropical forest site in central Amazonia, *Atmos. Environ.*, 34, 4063-4072.
- KFRI (Korea national forest research institute), 1994, *Hardwood Forest Inventory Report: Jeju planning district*. Report No. 85, Seoul, Korea.
- KFS (Korea Forest Service), 2008, [http://www.forest.go.kr/newkfsweb/kfi/kfs/stats/localStats.do?mn=KFS\\_04\\_01\\_01&ayear=2008&agubun1=1&asido=2&argubun=1&asubrgubun=0&x=39&y=7](http://www.forest.go.kr/newkfsweb/kfi/kfs/stats/localStats.do?mn=KFS_04_01_01&ayear=2008&agubun1=1&asido=2&argubun=1&asubrgubun=0&x=39&y=7)
- Kim, H.C., 2013, Characteristics of biogenic VOCs emission and the impact on the ozone formation in Jeju Island, Ph. D. Dissertation, Jeju National Univ., Jeju Special Self-Governing Province, Korea.
- Kim, H.C., Lee, K.H., 2010, A study on emission rates of VOCs from Conifers at Jeju Island, *J. Environmental Sciences*, 19, 627-637
- Kim, H.C., Lee, K.H., 2012, A study on emission rate of BVOCs from broad-leaved trees at Jeju Island, *J. Environmental Sciences*, 21, 613-724.
- Kim, K.J., 2003, A modelling study of the impact of natural and urban forest on the ambient ozone, Ph. D. Dissertation, Konkuk Univ., Seoul, Korea.
- Kim, S.T., 2011, Estimating influence of biogenic volatile organic compounds on high ozone concentrations over the Seoul metropolitan area during two episodes in 2004 and 2007 June, *J. Korean Society Atmospheric Environment*, 27(6), 751-771.
- Kim, S.T., Moon, N.K., Cho, K.T., Byun, D.W., Song, E.Y., 2008, Estimation of biogenic emissions over South Korea and its evaluation using air quality simulations, *J. Korean Society Atmospheric Environment*, 24, 423-438.
- Kim, Y.K., Jo, Y.S., Song, S.K., Kang, Y.H., Oh, I.B., 2010, Influence of isoprene emissions on ozone concentrations in the greater Busan area during a high ozone episode in 2006, *J. Environmental Science International*, 19, 829-841.
- NIER, 2005, <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/016/170001.pdf>
- Park, S.K., 2008, Sensitivity analysis of natural VOC to the tropospheric ozone using Models-3/CMAQ, Master's Dissertation, Kangwon National Univ., Kangwon-do, Korea.