

총 설

국내 주요 수종에서 배출되는 자연적 휘발성유기화합물의 배출특성 고찰

A Review on Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds Emitted from Major Tree Species in South Korea

유성지, 손윤석^{1)*}

부경대학교 지구환경시스템과학부, ¹⁾부경대학교 환경공학과

Seong-ji Yu, Youn-Suk Son^{1)*}

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2021년 5월 29일
수정일 2021년 6월 25일
채택일 2021년 7월 9일

Received 29 May 2021
Revised 25 June 2021
Accepted 9 July 2021

*Corresponding author

Tel: +82-(0)51-629-6522
E-mail: sonys@pknu.ac.kr

Abstract Volatile organic compounds (VOCs) produce atmospheric ozone (O₃), an air pollutant that causes climate change through photochemical reactions with nitrogen oxides. VOCs are divided into biogenic VOCs (BVOCs) and anthropogenic VOCs (AVOCs), global BVOCs emissions are estimated to be about 1007 Tg yr⁻¹. It is reported that emission rates of BVOCs are depended on the tree species, environmental factors (temperature, photosynthetically active radiation), seasons, regions, tree age, etc. In this study, we reviewed the emission characteristics of BVOCs according to species and environmental factors. In addition, sampling and analysis methods for measuring BVOC emitted from trees were introduced. As a result, it was confirmed that the emission rates of BVOCs from trees was considerably different depending on environmental factors and species. Therefore, in order to accurately estimate and manage the emission of air pollutants such as ozone, studies on the effects of these factors on BVOCs should be continuously conducted.

Key words: Biogenic volatile organic compounds, Isoprene, Monoterpene, Emission rate, Emission Flux

1. 서 론

휘발성유기화합물 (volatile organic compounds: VOCs)은 대기 중 질소산화물(NO_x)과 광화학산화반응을 통해 지구온난화 유발물질인 오존(O₃)을 생성한다(Fehsenfeld *et al.*, 1992). 국립환경과학원에 따르면 국내 대기 중 오존 농도는 매년 상승하고 있으며, 서울의 경우 1989년부터 2019년까지 오존 농도가 약 3배 증가한 것으로 나타났다(NIER, 2019). 이외에도 NO_x 배출량이 많은 국내 대도시들의 오존 농도가 모두 상승하고 있고, 국내 연간 오존 주의보 발생 일수가 2000년 (17회), 2005년 (19회), 2010년 (25회), 2015

년 (33회), 2019년 (60회)로 증가하는 것으로 나타나 오존 생성에 대한 관리가 절실히 필요한 실정이다.

이와 같이 대기 중에서 광화학산화반응을 통하여 오존을 생성하는 VOCs는 크게 인위적 휘발성유기화합물 (anthropogenic volatile organic compounds, AVOCs)과 자연적 휘발성유기화합물 (biogenic volatile organic compounds, BVOCs)로 구분되고, 전지구적 BVOCs 배출량은 대략 1007 Tg yr⁻¹로 추정된다(Guenther *et al.*, 2012). 일부 연구 결과에 따르면 식물에서 배출되는 BVOCs 중 테르펜류가 AVOCs 내의 주요물질보다 더 강력한 오존 전구체인 것으로 보고되었다(Dimitriadis, 1981). 특히, 우리나라는 전체 산림

면적이 약 6,335 천ha로 총 국토면적 대비 약 63.2%를 차지하며, OECD 회원국 중 산림을 4위로서 BVOCs 배출량이 많을 것으로 예상되고 그 관리 방안을 마련하는 것이 중요할 것으로 판단된다(KFS, 2015).

BVOCs는 1960년 Went (1960)에 의해 처음으로 대기 화학에 영향을 미칠 수 있다고 보고되었으며, 1970년대 미국에서 오존배출규제 이후 본격적으로 BVOCs에 대한 연구가 주목받기 시작했다(Dimitriades, 1981). BVOCs의 종류는 일반적으로 이소프렌(isoprene, C_5H_8), 모노테르펜(monoterpene, $C_{10}H_{16}$), 세스퀴테르펜(sesquiterpenes, $C_{15}H_x$), 기타 반응성 VOCs (other reactive VOCs, ORVOCs, $C_xH_yO_z$), 기타 VOCs (other VOCs, OVOCs)과 같이 총 다섯 가지로 구분할 수 있다(Steiner *et al.*, 2002; Kesselmeier and Staudt, 1999). 이 중 이소프렌과 모노테르펜으로 대표되는 테르펜노이드(terpenoid)는 전체 BVOCs 배출 추정량의 약 64%를 차지하며 AVOCs에 비해 OH 라디칼과 더 빠르게 반응하여 오존 생성에 큰 기여를 하는 물질로 간주되고 있다(Guenther *et al.*, 2012; Dimitriades, 1981).

이러한 테르펜노이드는 식물의 다양한 성장 과정을 통하여 잎과 줄기에 축적되고 식물 종에 따라서 배출되거나 저장된다(Pichersky and Gershenzon, 2002). 이 때, 테르펜노이드가 배출되는 속도는 합성 속도, 물리 화학적 특성, 용해도, 휘발성 및 확산성에 의해 결정된다(Peñuelas and Staudt, 2010). 이러한 특성은 식물의 종에 따라 결정되기 때문에 수종이 중요한 BVOCs의 배출영향인자임을 알 수 있다. 이와 더불어 BVOCs 배출에 영향을 미치는 주요한 환경요인으로는 온도, 유효광합성량(photosynthetically active radiation, PAR) 및 상대습도 등이 있다(Préndez *et al.*, 2014). 따라서 BVOCs의 배출특성을 파악하기 위하여 국내에 식재되어 있는 나무의 종류와 주요 환경인자에 따른 배출속도를 비교할 필요성이 있다. 이를 위해 본 총설에서는 국내 주요 수종을 대상으로 환경인자에 따른 배출특성을 수집하여 고찰하였다. 또한 이소프렌과 모노테르펜과 같은 주요 BVOCs의 생성 기작 및 영향인자, 시료채취 및 분석방법, 배출속도

결과를 비교하고 현재까지 진행된 연구들의 한계점 및 향후 연구방향에 대하여 논하고자 한다.

2. BVOCs

2.1 이소프렌

전체 BVOCs 배출량의 약 49%를 차지하는 이소프렌은 테르펜노이드가 생성되는 대사 과정에서 다이메틸알릴 피로인산(dimethylallyl pyrophosphate, DMAPP)의 피로인산(pyrophosphate)이 제거되어 생성되며 잎에 저장되지 않고 엽록소를 통해 바로 배출된다(Guenther *et al.*, 2012; Harley *et al.*, 1999; McGarvey and Croteau, 1995). 이 과정에서 이소프렌 활성효소가 이소프렌으로의 전환을 촉진하는데, 이 효소의 활성은 이소프렌 배출의 빛과 온도 의존성, 계절 변동성 등과 관련이 있는 것으로 보고된다(Harley *et al.*, 1999). 이러한 이소프렌은 대기 중 다른 탄화수소에 비해 OH 라디칼과의 반응속도가 빠르기 때문에 상대적으로 낮은 농도에서도 지역적인 광화학반응에 영향을 미치고, 질소산화물 농도가 높은 지역에서 높은 수준의 오존을 형성한다(Geron *et al.*, 2001; Williams *et al.*, 1997). 게다가 국내 수도권 지역에서 배출되는 전체 BVOCs 중 이소프렌이 오존 생성에 미치는 영향은 약 80%를 차지하는 것으로 보고되고 있어 이소프렌의 관리가 필요하다(Kim, 2011). 이소프렌의 배출량은 앞에서 언급한 이소프렌 활성효소로 인해 주로 온도와 빛의 세기가 가장 지배적인 인자이며(Geron *et al.*, 2001; Guenther *et al.*, 1993), 이외에도 식물의 종류, 캐노피 높이 및 식물이 가진 물과 영양소에 따른 스트레스가 이소프렌 배출량에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Kesselmeier and Staudt, 1999; Monson *et al.*, 1995; Sharkey and Loreto, 1993).

2.2 모노테르펜

모노테르펜은 제라닐 피로인산(geranyl pyrophosphate, GPP)과 이소펜테닐 피로인산(isopentenyl pyrophosphate, IPP)이 결합하여 생성된다(McGarvey

and Croteau, 1995). 이는 초식동물들로부터 식물이 자체 방어하기 위하여 식물내 상피 세포(epithelial cells)에서 생성되며 이소프렌과 달리 대기 중으로 직접 배출되지 않고 잎에 저장된다(McGarvey and Croteau, 1995; Monson *et al.*, 1995; Seufert *et al.*, 1995). 생성된 모노테르펜은 수지구(resin duct)와 같은 분비기관에 저장되며, 수지구 내의 에센셜 오일의 주성분으로 알려져 있다(Loreto *et al.*, 2000; Kesselmeier and Staudt, 1999; Bernard-Degan, 1988).

모노테르펜은 분비기관이 복잡할수록 배출량이 증가하는데 침엽수종의 경우 수지구와 같은 복잡한 분비기관을 가지고 있어 활엽수종에 비해 모노테르펜 배출량이 더 많은 것으로 보고되고 있다(McGarvey and Croteau, 1995; Lewinsohn *et al.*, 1991). 식물에서 대기 중으로 배출되는 모노테르펜의 종류는 약 35종 정도로 알려져 있으며 Zimmerman (1979)은 상대적 배출량에 따라 세 가지 그룹으로 모노테르펜을 분류하였다(Guenther *et al.*, 1994; Isidorov *et al.*, 1985). 그 중 가장 많이 배출되는 물질은 α -Pinene, β -Phellandrene, β -Pinene, Camphene, 1,8-Cineole, d-Limonene, Δ^3 -Carene, Myrcene, Sabinene 총 9종이라고 보고되었다(Guenther *et al.*, 1994; Zimmerman, 1979).

모노테르펜 배출에 영향을 미치는 요인으로는 잎의 온도, 상대습도, 잎의 수분, 빛의 세기, 식물의 상처, 물 스트레스, 잎의 C/N 비율 등이 있는 것으로 보고된다(Monson *et al.*, 1995; Lerdau *et al.*, 1994; Guenther *et al.*, 1993; Gershenson, 1984). 하지만 온도를 제외한 나머지 인자는 미미한 상관관계를 보이고 있어 온도에 의한 모노테르펜 배출특성 연구가 주로 이루어지고 있는 실정이다.

3. 수목에서 배출되는 BVOCs의 배출속도 산정 방법

수목에서 배출되는 BVOCs의 배출속도를 산정하기 위하여 다양한 방법론들이 사용되고 있다. 이러한

방법론들은 나무가 있는 현장에서 직접 적용하는 방법과 실험실에서 수행하는 방법으로 구분된다.

현장에서 직접 사용할 수 있는 방법으로는 1) 나무 및 가지를 직접 테들라백 등으로 둘러싼 후 농도를 측정하는 vegetation enclosure techniques (VET), 2) 미기상학적 방법을 이용하여 산림과 같은 특정 면적을 대상으로 배출플럭스를 측정하는 micrometeorological techniques (MMT), 3) 산림 지점에서 육불화황(SF₆)을 배출하고 탄화수소 농도와 육불화황의 흐름을 추적하여 탄화수소의 농도를 추정하는 atmospheric tracer techniques (ATT)가 대표적으로 알려져 있다(Lamb *et al.*, 1987; Allwine *et al.*, 1985; Zimmerman, 1979). 실험실 규모의 방법으로는 일반적으로 gas exchange chamber (GEC)가 이용되고 있다(Tingey *et al.*, 1979).

수종별 배출특성을 파악하기 위해서는 위의 다양한 방법론 중 VET 방식이 가장 적합하다. 국내에서는 국외의 semi-static enclosures (Zimmerman, 1979)와 dynamic flow-through chamber (Winer *et al.*, 1983)의 단점을 보완한 Kim (2001a)의 dynamic flow-through 챔버 시스템이 주로 사용되었다. 해당 시스템은 제작 비용이 경제적이며, 챔버 내부에 송풍기, 진공 펌프, 팬 등을 설치하지 않아 불필요한 오염과 시료손실을 최소화할 수 있는 장점들이 있어 국내 다수의 선행 연구에서 사용되었다(Kim *et al.*, 2020; Son *et al.*, 2015, 2012, 2006; Lim *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2007a, b).

이외에도 온도나 유효광합성량을 제외한 매개변수가 BVOCs 배출속도에 미치는 영향을 실험하기 위한 static enclosure chamber가 있다(Kim *et al.*, 2005). 해당 방법은 dynamic flow-through 챔버와 매우 유사하지만 큐벳(cuvette)을 이용하기 때문에 공기의 흐름이 정적이며, 나무의 가지를 절단한다는 차이점을 가지고 있다. 정적 챔버를 사용하는 경우 이산화탄소 감소, 수증기 응축, 열스트레스 등에 의해 영향을 받을 수 있다고 보고되어 있으나(Csiky and Seufert, 1999), 국내에서 수행된 연구 결과에 따르면 정적 챔

버와 동적 챔버 간의 배출속도 상관 계수는 0.888로 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다.

4. BVOCs 배출량 산정

4.1 BVOCs의 배출속도

BVOCs의 배출속도(Emission rates, ER)는 단위 시간당 단위 건중량(gram dry weight, gdw)당 배출되는 탄소의 양($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)으로 나타내며 BVOCs의 배출량을 비교하는 기본 단위로 사용된다. ER은 전체 유량, 샘플의 농도, 잎의 건중량을 이용하여 식 (1)과 같이 구한다. 이때 건중량은 시료채취가 끝난 나무의 잎을 60°C 이상의 온도에서 완전히 건조한 후의 무게를 의미한다.

$$\begin{aligned} \text{ER} (\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}) &= \text{total flow rate} (\text{L h}^{-1}) \\ &\times \text{sample concentration} (\mu\text{gC L}^{-1}) \\ &\div \text{total dry weight of leaves} (\text{gdw}) \end{aligned} \quad (1)$$

수종별 배출특성을 파악하기 위해서는 동일한 환경에서의 배출속도가 필요하다. 따라서 BVOCs 산출 모델을 통해 환경 보정 인자를 적용함으로써 온도 30°C 와 유효광합성량 $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서의 표준 배출속도(Standard emission rates, ERs)를 산출할 수 있다. 산출 모델의 종류는 G91, G93, T400, T800, BEIS (Biogenic Emissions Inventory System), EES, ESS, L87, HR 등과 같이 매우 다양하기 때문에 BVOCs의 종류, 시료채취 장소, 온도, PAR, 시간과 같은 환경 요인을 고려하여 모델을 선정하는 것이 적합하다 (Guenther *et al.*, 1993, 1991; Pierce and Waldruff, 1991; Chameides *et al.*, 1988; Lamb *et al.*, 1987; Evans *et al.*, 1985; Tingey *et al.*, 1981).

이소프렌의 배출속도는 온도와 빛에 대한 Guenther *et al.* (1993)의 식으로 나타낼 수 있다. 식 (2)는 이소프렌의 배출속도를 표준 배출속도에 빛 보정계수인 C_L 과 온도 보정계수인 C_T 를 곱하여 나타낸다. 이러한 보정계수 C_L 과 C_T 는 각각 식 (3)과 식 (4)를 통하여 계산할 수 있다. 식 (3)은 빛 보정계수의 산출

식으로 α 는 상수 0.0027, L 은 유효광합성량($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), C_{L1} 은 1000 PAR 일 때의 C_L 값인 상수 1.066이다. 식 (4)는 온도 보정계수의 산출식으로 R 은 이상기체 상수인 $8.314 (\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1})$, T 는 측정된 온도(K), T_S 와 T_M 은 각각 303K , 314K 이며 C_{T1} , C_{T2} 는 경험계수로 각각 $95,000 (\text{J mol}^{-1})$, $230,000 (\text{J mol}^{-1})$ 이다.

$$\text{ER} = \text{ERs} \times (C_L \cdot C_T) \quad (2)$$

$$C_L = \frac{\alpha C_{L1} L}{\sqrt{1 + \alpha^2 L^2}} \quad (3)$$

$$C_T = \frac{\exp\left(\frac{C_{T1}(T-T_S)}{RT_S T}\right)}{1 + \exp\left(\frac{C_{T2}(T-T_M)}{RT_S T}\right)} \quad (4)$$

모노테르펜의 배출속도는 온도에 의한 영향이 매우 지배적이기 때문에 이소프렌과 달리 빛을 제외한 온도에 대한 식으로 나타낸다. 식 (5)는 Tingey *et al.* (1980)이 제안한 산출식으로 $\ln(\text{ER})$ 은 모노테르펜의 배출속도의 자연로그 값($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$), a 와 b 는 상수, T 는 온도($^\circ\text{C}$)이다. 표준 배출속도의 경우 해당 식의 온도에 30°C 를 대입하여 나타낼 수 있고 Guenther *et al.* (1993)이 제안한 식 (6)으로도 나타낼 수 있다. 여기서 β 는 온도 민감도 계수(K^{-1})로 식 (5)에서 얻어진 b 값과 동일하며 T 와 T_S 는 각각 측정된 온도(K)와 표준상태의 온도(K)이다.

$$\ln(\text{ER}) = a + b(T) \quad (5)$$

$$\text{ER} = \text{ERs} \times \exp\{\beta(T-T_S)\} \quad (6)$$

4.2 BVOCs의 배출플럭스

앞선 식으로 산출한 배출속도는 나무의 일부분에서 배출되는 배출량을 상대적으로 비교하는데 적합할 수 있지만, 전체 나무에서 배출되는 탄화수소 배출의 절대량을 비교하는 용도로는 적합하지 않다 (Kim, 2001b). 따라서 나무에서 배출되는 BVOCs의 절대적인 배출량을 비교하기 위해 배출속도와 엽생체량을 이용하여 배출플럭스(Emission flux, EF)를

산출하는 것이 바람직하다.

EF는 토지 면적당 나무의 탄화수소 배출량($\mu\text{gC m}^{-2} \text{h}^{-1}$)으로 나타내며, 식 (7)과 같이, 앞서 구한 표준 배출속도와 엽생체량 (foliar biomass density, FBD)의 곱으로 나타낸다. FBD의 경우 식 (8)과 같이 SLW (specific leaf weight)와 LAI (leaf area index)의 곱으로 산출한다.

$$EF (\mu\text{gC m}^{-2} \text{h}^{-1}) = ERs (\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}) \times FBD (\text{gdw m}^{-2} \text{area}) \quad (7)$$

$$FBD (\text{gdw m}^{-2} \text{area}) = SLW (\text{gdw m}^{-2} \text{leaf}) \times LAI (\text{m}^2 \text{leaf m}^{-2} \text{area}) \quad (8)$$

SLW를 얻기 위해서는 SLA (specific leaf area)를 이용하여 이는 건중량 혹은 SLW로 변환하는 데 편리하다. 활엽수의 경우 엽면적 측정기를 사용하여 간편하게 측정할 수 있으나, 침엽수의 경우 바늘 모양의 엽면적을 구하기 위해 Johnson (1984)이 제안한 식 (9)를 사용한다. 식 (9)는 특정 면적 내 샘플의 엽면적과 건중량을 비례식을 이용하여 전체 엽면적과 건중량을 구하는 식으로, A_T 와 A_S 는 각각 전체 엽면적(m^2), 샘플의 엽면적(m^2)이며 DW_T 와 DW_S 는 각각 전체 건중량(g), 샘플의 건중량(g)이다. 이때 침엽수 샘플의 엽면적을 구하기 위해 식 (10)을 이용하며 L 은 침엽수 바늘의 길이(m), n 은 엽속(fascicle)당 바늘의 개수, v 는 바늘의 부피(m^3)이다. 나무의 샘플 건중량은 상대성장 방정식인 식 (11)을 사용하며, D 는 나무의 가슴높이지름(m), H 는 표본 나무의 높이(m), A 와 h 는 고유상수로 h 의 경우 상대성장계수이다. 배출 플럭스와 관련된 자세한 설명은 국내에서 수행된 다음 논문에서 제공된다(Son *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2008).

$$A_T = A_S \times \left(\frac{DW_T}{DW_S} \right) \quad (9)$$

$$A_S = 2L \times \left(1 + \frac{\pi}{n} \right) \times \sqrt{\frac{vn}{\pi L}} \quad (10)$$

$$\log DW_S = h \times \log D^2 H + \log A \quad (11)$$

5. 국내 수종의 BVOCs 배출특성

5.1 국내 연구 수종

국내에서 수행된 수종별 BVOCs 배출특성 연구는 현재까지 활엽수 11종, 침엽수 9종, 은행나무 1종에 대하여 연구가 진행되어 왔다. 표 1은 국내에서 연구가 진행된 수종들의 목록과 주요 수종의 산림면적을 나타낸 것으로, 이 중 산림면적 결과가 있는 수종은 산림청이 지정한 주요 수종이다(KFS, 2020). 연구가 수행된 주요 수종으로는 활엽수는 참나무류(*Quercus*), 침엽수는 편백(*C. obtusa*), 낙엽송(*L. leptolepis*), 소나무(*P. densiflora*), 잣나무(*P. koraiensis*), 리기다소나무(*P. rigida*), 곰솔(*P. thunbergii*)이 이에 해당한다. 특히 국내는 참나무류(15.39%)와 소나무와 곰솔(24.67%)의 산림율이 매우 높은 것으로 나타나 해당 수종의 연구가 활발히 진행된 것으로 보이거나 이와 반대로 주요 수종으로 분류되지만 연구가 수행되지 않은 수종에는 밤나무(*C. crenata*), 아까시나무(*R. pseudoacacia*), 자작나무(*B. platyphylla*) 등이 있다. 이들이 각각 차지하고 있는 산림면적은 1.22%, 0.34%, 0.35%로 높은 비율을 나타내지는 않지만, 정확한 국내 BVOCs 인벤토리 구축을 위해서는 추후 해당 수종에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

5.2 온도와 유효광합성량에 따른 배출특성

테르펜노이드 배출에 가장 큰 환경요인으로 알려진 온도와 유효광합성량에 따른 배출속도의 의존성을 조사하는 연구는 지난 20여 년 동안 지속적으로 진행되고 있다. 이소프렌의 경우 식 (2)의 빛, 온도 보정계수인 $C_L \cdot C_T$ 와 배출속도 간의 상관계수(R^2)를 통해 상관성을 파악할 수 있으며, 모노테르펜의 경우 식 (5)와 (6)의 온도 민감도 계수(b 혹은 β)를 통해 해당 수종이 얼마나 온도에 민감한지를 나타낼 수 있다. 이러한 온도 민감도는 계절별 배출속도 변화, 모노테르펜에 대한 증기압과 용해도의 차이, 식물 내 저장 및 분비기관의 차이에 의해 상이할 수 있다

Table 1. Domestic research tree species and forest area by species.

Leaf shape	Subsection	Tree species	Forest area (%)
Broad-leaved trees	Carpinus	Carpinus laxiflora	–
		Platanus	Platanus orientalis
	Prunus	Prunus serrulata	–
		Quercus	Quercus acutissima
	Quercus aliena		–
	Quercus crispula		–
	Quercus mongolica		–
	Quercus serrata		–
	Quercus variabilis		–
	Styrax		Styrax japonicus
Zelkova	Zelkova serrata	–	
Coniferous trees	Abies	Abies holophylla	–
		Abies koreana	–
	Chamaecyparis	Chamaecyparis obtusa	0.83%
	Cryptomeria	Cryptomeria japonica	–
	Larix	Larix leptolepis	4.31%
	Pinus	Pinus densiflora	24.67%
		Pinus thunbergii	–
		Pinus rigida	4.09%
Pinus koraiensis	2.70%		
Ginkgo trees	Ginkgo	Ginkgo biloba	–

(Guenther *et al.*, 1993). 따라서 BVOCs 배출특성 연구의 경우 배출속도와 각 보정계수 간의 상관계수를 나타냄으로써 대상 수종이 환경인자에 의해 얼마나 영향을 받는지를 확인할 수 있다. 선행 연구에서 산출된 결과들을 표 2와 3에 제시하였다.

표 2는 국내에서 수행된 활엽수종의 이소프렌 배출속도와 보정인자 간 상관계수 결과들을 수종별로 나타낸 것이다. 굴참나무 (*Q. variabilis*, $R^2 = 0.35\text{--}0.38$)를 제외한 모든 수종에서 높은 상관성을 보이고 있었다. 이는 굴참나무를 제외한 수종들은 온도와 유효광합성량의 증가에 따라 이소프렌의 배출속도가 증가한다는 것을 의미한다. 상수리나무 (*Q. acutissima*)의 경우 세 연구팀에 의해 연구가 수행되었는데 상수리나무¹⁾의 경우 비교적 높은 상관성 ($R^2 = 0.95$)를 보였으며 상수리나무^{3),4)}의 경우 비교적 낮은 상관성을 보이고 있다 ($R^2 = 0.4\text{--}0.44$, $R^2 = 0.44$). 이 경우 측정된 시기의 차이와 측정 장소의 차이 (제주도와 경상북도)에 따른 토지의 비옥도와 기후의 차이로 인하여 상이한 결과를 나타난 것으로 판단된다. 이는

Table 2. Comparison of isoprene correlation coefficient (ERs vs Environmental correction factor).

Trees	R^2	Ref.
	ERs vs $C_L \cdot C_T$	
Carpinus laxiflora	0.82	Kim and Lee (2012)
Quercus acutissima ¹⁾	0.95	Kim and Lee (2012)
Quercus acutissima ²⁾	0.44 ⁴⁾ , 0.79 ⁵⁾	Kim <i>et al.</i> (2004a)
Quercus acutissima ³⁾	0.4~0.44	Lim <i>et al.</i> (2011)
Quercus aliena	0.61~0.81	Lim <i>et al.</i> (2011)
Quercus crispula	0.72	Kim and Lee (2012)
Quercus mongolica	0.59~0.84	Lim <i>et al.</i> (2011)
Quercus serrata	0.95	Kim and Lee (2012)
Quercus serrata	0.93	Kim <i>et al.</i> (2004a)
Quercus serrata	0.8~0.91	Lim <i>et al.</i> (2011)
Quercus variabilis	0.35~0.38	Lim <i>et al.</i> (2011)
Styrax japonicus	0.86	Kim and Lee (2012)

¹⁾Kim and Lee (2012)²⁾Kim *et al.* (2004a)³⁾Lim *et al.* (2011)⁴⁾Sampling site : Gumsung mountain⁵⁾Sampling with cuvette test

측정 장소가 배출속도에 영향을 주는 요인임을 시사한다. 또한 해당 세 팀이 연구한 졸참나무 (*Q. serrata*)

Table 3. Comparison of monoterpene correlation coefficient (ERs vs Temperature) and β -value.

Trees	R ² ERs vs Temp.	β -value (K ⁻¹)	Ref.
<i>Abies koreana</i>	0.863	0.0954	Kim and Lee (2010)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.8786	0.0649	Kim and Lee (2010)
<i>Cryptomeria japonica</i>	0.771	0.1067	Kim and Lee (2010)
<i>Larix leptolepis</i>	0.161	0.085	Kim <i>et al.</i> (2007b)
<i>Pinus densiflora</i>	0.7793	0.0629	Kim and Lee (2010)
	0.637~0.642	0.138~0.190	Kim <i>et al.</i> (2004b)
	0.06~0.803	0.047~0.179	Lim <i>et al.</i> (2008)
<i>Pinus koraiensis</i>	0.035~0.786	0.079~0.263	Son <i>et al.</i> (2015)
<i>Pinus rigida</i>	0.330~0.367	0.042~0.062	Kim <i>et al.</i> (2004b)
	0.078~0.368	0.033~0.079	Son <i>et al.</i> (2015)
<i>Pinus thunbergii</i>	0.826	0.0951	Kim and Lee (2010)

의 경우 상관성 ($R^2=0.95$, $R^2=0.93$, $R^2=0.8-0.91$)의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 이와 같은 연구 결과들을 종합해 볼 때, 졸참나무는 온도와 유효광합성량에 지배적이고, 상수리나무는 온도와 유효광합성량 이외의 인자에 영향을 받는 것으로 예상된다. 따라서 상수리나무의 경우 다양한 인자에 대하여 배출특성을 추가로 연구해야 할 필요성이 있을 것으로 보인다.

표 3은 국내에서 수행된 침엽수의 모노테르펜 배출속도와 온도와의 상관계수, 그리고 β 값을 나타낸다. 식 (6)을 고안한 Guenther *et al.* (1993)은 연구수종의 75%에서 β 값이 $0.09 \pm 0.025 \text{ K}^{-1}$ 의 범위를 나타낸다고 하였으며, 국내의 연구수종 중 구상나무 (*A. koreana*, 0.0954 K^{-1}), 편백 (*C. obtusa*, 0.0649 K^{-1}), 삼나무 (*C. japonica*, 0.1067 K^{-1}), 낙엽송 (*L. leptolepis*, 0.085 K^{-1}), 일부 소나무 (*P. densiflora*, $0.138-0.190 \text{ K}^{-1}$)와 곰솔 (*P. thunbergii*, 0.0951 K^{-1})과 같이 대부분의 수종에서 선행 연구의 범위와 일치하는 것을 보였다. 잣나무 (*P. koraiensis*)는 β 값이 $0.079-0.263 \text{ K}^{-1}$ 로 다른 수종들에 비해 β 값이 큰 것으로 나타났으며 이는 잣나무는 다른 수종에 비해 온도에 민감하다는 것을 알 수 있다. 리기다소나무 (*P. rigida*)는 두 연구팀에 의해 조사되었으며 두 β 의 범위가 비슷한 수준으로 나타났다 ($\beta=0.042-0.062$, $\beta=0.033-0.079$). 이는 다른 수종에 비해 β 값이 작아 온도에 대한 민감도가 적을

것으로 사료된다. 소나무의 경우 β 값의 범위가 연구진에 따라서 서로 상이한 것으로 나타났는데 ($\beta=0.0629$, $\beta=0.138-0.190$, $\beta=0.047-0.179$), 이는 측정 장소가 제주도, 경상북도, 경상남도, 충청북도로 모두 다르고 측정 시기에 따른 기상 환경 차이에 의한 것으로 보인다.

5.3 계절에 따른 배출특성

국내의 경우 계절에 따라 매우 다른 기온 분포 및 기후적 특성을 보이고 있어 계절별 배출특성을 반드시 규명하고 차별화된 관리가 필요하다. 표 4는 국내에서 수행된 침엽수종의 계절별 테르펜노이드의 배출속도를 보여주고 있다. 리기다소나무, 잣나무, 소나무²⁾의 경우 봄에 가장 높은 배출속도를 보였고, 겨울에 가장 낮은 배출속도를 보이고 있다. 특히 리기다소나무와 잣나무의 경우 봄과 겨울의 배출속도가 16~33배 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 모노테르펜 배출의 온도의존성에 의해 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 이와 다르게 낙엽송의 경우 가을에 가장 큰 배출속도를 보였다. 이는 낙엽송이 다른 침엽수와 생리적 특성이 상이하기 때문에 나타난 결과라고 보고되고 있다 (Kim *et al.*, 2007b). 이처럼 같은 침엽수 일지라도 생리적 특성이 다른 수종이 존재할 수 있으므로, 보다 다양한 수종에 대하여 계절별 배출특성을 파악해야 할 필요성이 있다.

Table 4. Seasonal BVOCs emission rate from coniferous trees.

Trees	Season	ER ($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Ref.
		Monoterpene	Isoprene	
Pinus rigida	Spring	1.198 \pm 0.713	–	Son <i>et al.</i> (2015)
	Summer	0.630 \pm 0.264	–	
	Fall	0.675 \pm 0.266	–	
	Winter	0.073 \pm 0.035	–	
Pinus koraiensis	Spring	0.835 \pm 1.081	–	
	Summer	0.220 \pm 0.101	–	
	Fall	0.117 \pm 0.131	–	
	Winter	0.025 \pm 0.035	–	
Pinus densiflora ¹⁾	Spring	1.208	–	Lim <i>et al.</i> (2008)
	Summer	1.704	–	
	Fall	1.172	–	
	Winter	1.052	–	
Pinus densiflora ²⁾	Spring	1.612	–	
	Summer	1.310	–	
	Fall	1.139	–	
	Winter	0.817	–	
Larix leptolepis	Spring	0.457	0.085	Kim <i>et al.</i> (2007b)
	Summer	0.464	0.141	
	Fall	0.622	0.065	

¹⁾Sampling site : Gumsung mountains

²⁾Sampling site : Worak mountains

표 5는 국내에서 수행된 활엽수종의 계절별 배출 속도를 나타낸 결과이다. 활엽수의 경우 대부분의 수종에서 여름에 가장 높은 이소프렌 배출속도를 보이고 있으며 졸참나무¹⁾, 신갈나무 (*Q. mongolica*)는 봄이 가장 높고, 굴참나무는 가을철에 가장 높게 나타났다. 일반적으로 여름에 가장 높은 배출속도를 보이는 이유는 PAR 및 온도가 높아 식물 성장이 가장 활발했기 때문이라고 보고되고 있다. 뚜렷하게 봄에 가장 높은 배출속도를 보이는 졸참나무¹⁾의 경우 봄 동안 식물의 발아와 잎 성장 초기단계에서 이소프렌 배출이 높아지기 때문에 봄에 가장 높은 배출속도를 보일 것으로 예상하였으나 (Lim *et al.*, 2011; Hakola *et al.*, 1998) 동일한 졸참나무²⁾ 사이에도 서로 다른 특성을 보이고 있어 측정 장소와 같은 다른 환경요인이 작용한 것으로 판단된다.

5. 4 수령에 따른 배출특성

기존의 연구에 따르면 수령이 BVOCs 배출량과 유

의한 차이가 있는 것으로 보고되고 있다 (Kim *et al.*, 2005; Nunes and Pio, 2001). 국내에서는 4개 수종에 대하여 수령에 따른 표준 배출속도를 비교한 연구 결과가 보고되었다 (그림 1). 활엽수종인 신갈나무와 갈참나무 (*Q. aliena*)는 모두 어린 수종에서 더 높은 이소프렌 배출속도를 보이고 있으며, 이는 어린 나무의 생장활동이 더 활발하기 때문이라고 보고되고 있다 (Son *et al.*, 2015). 또한 국외 연구결과에 따르면 활엽수종인 유칼립투스 (*E. globulus*) 또한 어린나무의 배출속도가 더 높게 배출되는 것으로 나타났다 (Nunes and Pio, 2001). 이와 달리 침엽수종인 리기다소나무와 소나무는 수령에 의한 배출특성이 서로 다르게 나타났다. 리기다소나무의 경우 어린 나무에서 더 높은 배출속도를 확인할 수 있었고, 소나무는 두 나무 모두 수령이 높은 나무의 배출속도가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 나무의 수령에 따라 BVOCs의 배출특성이 수종에 따라 확연한 차이가 있음을 시사하고, 향후 BVOCs의 배출량 산정 등에 있어서 이러한 수령 등의

Table 5. Seasonal BVOCs emission rate from broad-leaved trees.

Trees	Season	ER ($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Ref.
		Monoterpene	Isoprene	
Quercus serrata ¹⁾	Spring	–	130.5	Lim <i>et al.</i> (2011)
	Summer	–	101.4	
	Fall	–	101.4	
Quercus serrata ²⁾	Spring	0.21	64.0	Kim and Lee (2012)
	Summer	0.19	79.5	
	Fall	0.16	60.05	
Quercus acutissima	Spring	–	0.038	Lim <i>et al.</i> (2011)
	Summer	–	0.062	
	Fall	–	0.048	
Quercus acutissima	Spring	0.23	1.35	Kim and Lee (2012)
	Summer	0.24	1.71	
	Fall	0.19	0.88	
Quercus crispula	Spring	0.24	13.64	Kim and Lee (2012)
	Summer	0.36	15.18	
	Fall	0.23	11.99	
Quercus aliena	Spring	–	63.8	Lim <i>et al.</i> (2011)
	Summer	–	78.8	
	Fall	–	9.83	
Quercus mongolica	Spring	–	64.4	Lim <i>et al.</i> (2011)
	Summer	–	58.1	
	Fall	–	7.06	
Quercus variabilis	Summer	–	0.035	Lim <i>et al.</i> (2011)
	Fall	–	0.092	
Carpinus laxiflora	Spring	0.31	0.96	Kim and Lee (2012)
	Summer	0.40	1.00	
	Fall	0.29	0.63	
Styrax japonicus	Spring	0.20	5.33	Kim and Lee (2012)
	Summer	0.22	6.35	
	Fall	0.18	5.11	

¹⁾Lim *et al.* (2011)
²⁾Kim and Lee (2012)

내용을 명확히 명시하고 적용해야 할 것이다.

5.5 국내 수종별 표준배출속도

각기 다른 환경에서 측정된 BVOCs의 배출속도를 비교하기 위하여 일정한 조건(온도 30°C, 유효광합성량 $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)에서의 표준배출속도를 산출하며 이는 수종별 배출속도를 비교하는 데 적합하다. 표 6은 국내에서 수행된 연구대상 수종에 대하여 표준배출속도 결과를 나타내고 있다. 활엽수의 경우 이소프렌 배출속도는 나무별 최대값을 기준으로 졸참

나무 > 갈참나무 > 버즘나무 (*P. orientalis*) > 신갈나무 > 물참나무 (*Q. crispula*) > 때죽나무 (*S. japonicus*) > 상수리나무 > 서어나무 (*C. laxiflora*) > 굴참나무 순으로 나타났으며 벚나무 (*P. serrulate*), 느티나무 (*Z. serrata*), 은행나무 (*G. biloba*)는 검출한계 이하로 나타났다. 졸참나무의 경우 두 연구팀에 의해 측정되었으며 졸참나무²⁾가 졸참나무¹⁾보다 배출속도가 약 2배 높았고, 상수리나무 또한 같은 두 연구팀에 의해 측정되어 상수리나무¹⁾이 상수리나무²⁾보다 배출속도가 약 19~31배 가량 높은 것을 확인할 수 있었다. 이와

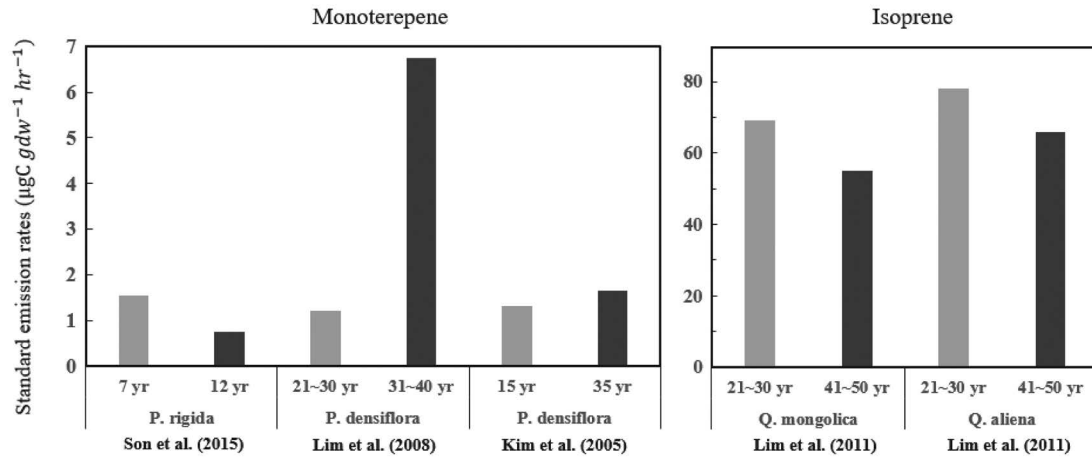


Fig. 1. Comparison of BVOCs standard emission rates by tree ages.

Table 6. Standard emission rate by tree species.

Trees	ERs (µgC gdw ⁻¹ h ⁻¹)		Ref.
	Isoprene	Monoterpene	
<i>Carpinus laxiflora</i>	0.76	-	Kim and Lee (2012)
<i>Platanus orientalis</i>	67.011	-	Son <i>et al.</i> (2012)
<i>Prunus serrulata</i>	MDL	-	Son <i>et al.</i> (2012)
<i>Quercus acutissima</i> ¹⁾	1.16	-	Kim and Lee (2012)
<i>Quercus acutissima</i> ²⁾	0.038~0.062	-	Lim <i>et al.</i> (2011)
<i>Quercus aliena</i>	9.83~78.8	-	Lim <i>et al.</i> (2011)
<i>Quercus crispula</i>	12	-	Kim and Lee (2012)
<i>Quercus mongolica</i>	7.06~64.4	-	Lim <i>et al.</i> (2011)
<i>Quercus mongolica</i>	31.532	-	Son <i>et al.</i> (2012)
<i>Quercus serrata</i> ¹⁾	59.87	-	Kim and Lee (2012)
<i>Quercus serrata</i> ²⁾	101.4~130.5	-	Lim <i>et al.</i> (2011)
<i>Quercus variabilis</i>	0.035~0.092	-	Lim <i>et al.</i> (2011)
<i>Styrax japonicus</i>	4.94	-	Kim and Lee (2012)
<i>Zelkova serrata</i>	MDL	-	Son <i>et al.</i> (2012)
<i>Abies holophylla</i>	-	1.89	Son <i>et al.</i> (2012)
<i>Abies koreana</i>	-	1.86	Kim and Lee (2010)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	-	0.52	Kim and Lee (2010)
<i>Cryptomeria japonica</i>	-	1.22	Kim and Lee (2010)
<i>Larix leptolepis</i>	-	0.457~0.622	Kim <i>et al.</i> (2007b)
<i>Pinus densiflora</i>	-	1.734	Son <i>et al.</i> (2012)
<i>Pinus densiflora</i>	-	0.817~1.787	Lim <i>et al.</i> (2008)
<i>Pinus densiflora</i>	-	1.78	Kim and Lee (2010)
<i>Pinus koraiensis</i>	-	0.366	Son <i>et al.</i> (2012)
<i>Pinus koraiensis</i>	-	0.033~0.182	Son <i>et al.</i> (2015)
<i>Pinus rigida</i>	-	0.228~1.263	Son <i>et al.</i> (2015)
<i>Pinus thunbergii</i>	-	1.34	Kim and Lee (2010)
<i>Ginkgo biloba</i>	MDL	-	Son <i>et al.</i> (2012)

¹⁾Kim and Lee (2012)

²⁾Lim *et al.* (2011)

Table 7. Emission flux by tree species.

Trees	Seasons	SLW	LAI	FBD	EF	Ref.
		(gdw m ⁻² leaf)	(m ² leaf m ⁻² area)	(gdw m ⁻² area)	(μgC m ⁻² h ⁻¹)	
Pinus densiflora	Summer	89.2	6.58	586.9	1000.1	Lim <i>et al.</i> (2008)
	Winter	86.3	6.58	567.9	597.4	
Pinus rigida	Summer	140	4.72	660.8	381.9	Son <i>et al.</i> (2015)
	Winter	63.4	4.72	299.2	68.2	
Larix leptolepis	Summer	100	4.82	482	223.6	Kim <i>et al.</i> (2007b)
Pinus koraiensis	Summer	135	4	540	98.3	Son <i>et al.</i> (2015)
	Winter	149	4	596	19.7	
Quercus serrata	Summer	74.1	5.6	415	42081	Lim <i>et al.</i> (2011)
Quercus acutissima		82.4	5	412	25.544	
Quercus aliena		74.1	5.6	415	32702	
Quercus mongolica		74.1	5.6	415	24111.5	
Quercus variabilis		82.4	5	412	14.42	

같이 같은 수종일지라도 온도 및 유효광합성량 외 인자인 수령, 측정장소, 측정시기로 인한 기상환경, 토양특성으로 인하여 배출속도의 차이를 보이는 것으로 판단된다.

침엽수의 경우 모노테르펜 배출속도가 나무별 최대값을 기준으로 전나무 (*A. holophylla*) > 구상나무 > 소나무 > 곱솔 > 리기다소나무 > 삼나무 > 낙엽송 > 편백 > 잣나무 순으로 나타났다. 소나무의 배출속도는 세 연구팀에 의해 측정되었으며, 모두 비슷한 배출속도 범위를 나타내는 것으로 보아 소나무는 온도에 매우 지배적인 특성을 보이는 것으로 사료된다. 이와 반대로 잣나무의 경우 두 연구팀 간 배출속도 차이가 약 2배~11배 정도 차이를 보였는데, 이는 묘목과 성목의 차이, 측정 장소 등 온도를 제외한 영향 인자가 지배적으로 작용하고 있음을 시사한다.

이처럼 수종별로 배출속도에 영향을 미치는 주요 인자가 온도 및 유효광합성량 뿐만 아니라 토지 비옥도, 수령, 기후, 공기 구성, 스트레스 등과 같은 매우 다양한 인자에 의해서 영향을 받으며, 각각의 인자에 대한 배출특성 연구가 수종별로 다양하게 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5.6 국내 수종별 배출플럭스

나뭇가지의 일부분에서 측정한 배출속도는 전체

나무의 관점에서 발생하는 BVOCs의 양을 비교하기에는 한계가 있다. 따라서 4.2장의 배출플럭스 산출식을 활용하여 잎의 고유 정보인 엽생체량을 산출하고, 이를 통해 배출플럭스를 구하여 이를 비교하였다. 표 7은 국내에서 수행된 배출플럭스 결과를 나타내고 있다. BVOCs 배출이 가장 활발한 여름을 기준으로 침엽수의 배출플럭스는 소나무 > 리기다소나무 > 낙엽송 > 잣나무 순으로 나타났으며, 이는 표준배출속도와 같은 순서를 보이고 있다. 대체로 여름이 겨울보다 약 2~6배 정도 높았으며 소나무와 잣나무는 배출속도의 차이에서 비롯되었고, 리기다소나무는 엽생체량과 배출속도 모두 겨울이 낮아 비롯된 결과로 보인다.

활엽수의 경우 겨울에는 잎이 없기 때문에 엽생체량 정보가 없어 여름 데이터만 존재하며 배출플럭스는 줄참나무 > 갈참나무 > 신갈나무 > 상수리나무 > 굴참나무 순으로 나타났다. 이는 표준배출속도의 경향과 동일함을 보였고, 활엽수의 엽생체량은 모두 비슷한 412, 415 gdw m⁻² area 수준을 보이고 있었다.

6. 결 론

수목에서 배출되는 BVOCs는 대류권 오존생성의

로 인한 기후변화 유발, 2차 미세먼지 생성 등과 같은 문제들을 야기함으로써 국내의 경우 2001년 이후부터 본격적인 연구가 진행되고 있다. 전 지구적으로 BVOCs 배출량은 AVOCs보다 상당 배수 많을 것으로 예상되고 있으나 국내의 높은 산림율에도 불구하고 정확한 배출량 조사 및 관리가 미흡한 실정이다. 이에 정확한 BVOCs의 배출량 산정을 위하여 수목의 종류, 온도 및 유효광합성량과 같은 환경인자, 식재 지역 및 수령과 같은 기타 인자에 따른 BVOCs에 대한 배출특성 조사를 통한 자료를 수집해야 할 것으로 보인다. 현재 국내의 수종별 배출특성 연구는 일부 수종에 대해서만 연구되었으며 BVOCs의 종류가 이소프렌 및 모노테르펜에만 치중되어 있다는 한계점이 있다. 또한 지역의 차이에 따른 기후 및 토지 특성에 따라 배출속도에 영향이 있을 것으로 판단되어 다양한 지역에서의 지역별 특성에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다. 이와 더불어, 수목의 고유한 엽생체량 측정 정보를 활용한 배출플럭스 산출에 대한 연구도 활발히 진행되어야만 정확한 국가 배출량 인벤토리를 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Allwine, G., Lamb, B., Westberg, H. (1985) Application of atmospheric tracer techniques for determining biogenic hydrocarbon fluxes from an oak forest, In *The Forest-Atmosphere Interaction* (pp. 361-382), Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5305-5_23
- Bernard-Dagan, C. (1988) Seasonal variations in energy sources and biosynthesis of terpenes in maritime pine, In *Mechanisms of woody plant defenses against insects* (pp. 93-116), Springer, New York, NY, https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3828-7_5
- Chameides, W.L., Lindsay, R.W., Richardson, J., Kiang, C.S. (1988) The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study, *Science*, 241(4872), 1473-1475. <https://doi.org/10.1126/science.3420404>
- Csiky, O., Seufert, G. (1999) Terpenoid emissions of Mediterranean oaks and their relation to taxonomy, *Ecological Applications*, 9(4), 1138-1146. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1999\)009\[1138:TEOMOA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1999)009[1138:TEOMOA]2.0.CO;2)
- Dimitriades, B. (1981) The role of natural organics in photochemical air pollution: issues and research needs, *Journal of the Air Pollution Control Association* (United States), 31(3). <https://doi.org/10.1080/00022470.1981.10465213>
- Evans, R.C., Tingey, D.T., Gumpertz, M.L. (1985) Interspecies variation in terpenoid emissions from Engelmann and Sitka spruce seedlings, *Forest Science*, 31(1), 132-142. <https://doi.org/10.1093/forestscience/31.1.132>
- Fehsenfeld, F., Calvert, J., Fall, R., Goldan, P., Guenther, A.B., Hewitt, C.N., Lamb, B., Liu, S., Trainer, M., Westberg, H., Zimmerman, P. (1992) Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry, *Global Biogeochemical Cycles*, 6(4), 389-430. <https://doi.org/10.1029/92GB02125>
- Geron, C., Harley, P., Guenther, A. (2001) Isoprene emission capacity for US tree species, *Atmospheric Environment*, 35(19), 3341-3352. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00407-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00407-6)
- Gershenson, J. (1984) Changes in the levels of plant secondary metabolites under water and nutrient stress, In *Phytochemical adaptations to stress* (pp. 273-320), Springer, Boston, MA, https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1206-2_10
- Guenther, A.B., Jiang, X., Heald, C.L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L.K., Wang, X. (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. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>
- Guenther, A.B., Monson, R.K., Fall, R. (1991) Isoprene and monoterpene emission rate variability: observations with eucalyptus and emission rate algorithm development, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96(D6), 10799-10808. <https://doi.org/10.1029/91JD00960>
- Guenther, A.B., Zimmerman, P.R., Harley, P.C., Monson, R.K., Fall, R. (1993) Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D7), 12609-12617. <https://doi.org/10.1029/93JD00527>

- Guenther, A., Zimmerman, P., Wildermuth, M. (1994) Natural volatile organic compound emission rate estimates for US woodland landscapes, *Atmospheric Environment*, 28(6), 1197-1210. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90297-6](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90297-6)
- Hakola, H., Rinne, J., Laurila, T. (1998) The hydrocarbon emission rates of tea-leaved willow (*Salix phylicifolia*), silver birch (*Betula pendula*) and European aspen (*Populus tremula*), *Atmospheric Environment*, 32(10), 1825-1833. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00482-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00482-2)
- Harley, P.C., Monson, R.K., Lerdau, M.T. (1999) Ecological and evolutionary aspects of isoprene emission from plants, *Oecologia*, 118(2), 109-123. <https://doi.org/10.1007/s004420050709>
- Isidorov, V.A., Zenkevich, I.G., Ioffe, B.V. (1985) Volatile organic compounds in the atmosphere of forests, *Atmospheric Environment* (1967), 19(1), 1-8. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(85\)90131-3](https://doi.org/10.1016/0004-6981(85)90131-3)
- Johnson, J.D. (1984) A rapid technique for estimating total surface area of pine needles, *Forest Science*, 30(4), 913-921. <https://doi.org/10.1093/forestscience/30.4.913>
- Kesselmeier, J., Staudt, M. (1999) Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 33(1), 23-88. <https://doi.org/10.1023/A:1006127516791>
- Kim, H.C., Lee, K.H. (2010) A study on emission rates of VOCs from conifers at Jeju Island, *Journal of Environmental Science International*, 19(5), 627-637. <https://doi.org/10.5322/JES.2010.19.5.627>
- Kim, H.C., Lee, K.H. (2012) A study on emission rate of BVOCs from broad-leaved trees at Jeju Island, *Journal of Environmental Science International*, 21(6), 713-724. <https://doi.org/10.5322/JES.2012.21.6.713>
- Kim, J.C. (2001a) Development of a Novel Sampling Technique for Natural VOC Emissions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 17(E2), 61-70.
- Kim, J.C. (2001b) Factors controlling natural VOC emissions in a southeastern US pine forest, *Atmospheric Environment*, 35(19), 3279-3292. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00522-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00522-7)
- Kim, J.C., Kim, K.J., Hong, J.H., Sunwoo, Y., Lim, S.G. (2004a) A comparison study on isoprene emission rates from oak trees in summer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(1), 111-118.
- Kim, J.C., Hong, J.H., Gang, C.H., Sunwoo, Y., Kim, K.J., Lim, J.H. (2004b) Comparison of monoterpene emission rates from conifers, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(2), 175-183.
- Kim, J.C., Kim, K.J., Kim, D.S., Han, J.S. (2005) Seasonal variations of monoterpene emissions from coniferous trees of different ages in Korea, *Chemosphere*, 59(11), 1685-1696. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.048>
- Kim, K.J., Kim, J.C., Lim, Y.J., Son, Y.S., Sunwoo, Y., Cho, K.T. (2007a) A Study on the isoprene emission rates from deciduous tree (*Quercus Mongolica Fischer*), *Journal of Environmental Science International*, 16(3), 269-275, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2007.16.3.269>
- Kim, K.J., Kim, J.C., Lim, J.H., Sunwoo, Y., Park, H.J., Cho, K.T. (2007b) Study on natural VOC emission rates and characteristics emitted from *Larix Leptolepis* (Sieb. et Zucc.) Gordon, *Journal of Environmental Science International*, 16(2), 151-158, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2007.16.2.151>
- Kim, S.Y., Kim, J.C., Park, C.R., Son, Y.S. (2020) Emission characteristics of biogenic volatile organic compounds from representative plant species of the Korean peninsula-Focused on aldehydes, *Atmospheric Research*, 236, 104840. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104840>
- 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, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(6), 751-771. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.6.751>
- Korea Forest Service (KFS) (2015) Basic forest statistics 2015. https://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/select-BoardList.do?mn=NKFS_04_05_10&pageIndex=1&pageUnit=10&searchtitle=title&searchcont=&searchkey=&searchwriter=&searchdept=&searchWrd=&ctgrYrLrcl=CTGRY070&ntcStartDt=&ntcEndDt=&bbsId=BBSMSTR_1016
- Korea Forest Service (KFS) (2020) Statistical yearbook of forestry. https://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/select-BoardList.do?bbsId=BBSMSTR_1064&mn=NKFS_04_05_09
- Lamb, B., Guenther, A., Gay, D., Westberg, H. (1987) A national inventory of biogenic hydrocarbon emissions, *Atmospheric Environment* (1967), 21(8), 1695-1705. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(87\)90108-9](https://doi.org/10.1016/0004-6981(87)90108-9)
- Lerdau, M.T. (1994) Ecological controls over monoterpene emissions from conifers, Doctoral dissertation, Stanford University.

- Lewinsohn, E., Gijzen, M., Croteau, R. (1991) Defense mechanisms of conifers: differences in constitutive and wound-induced monoterpene biosynthesis among species, *Plant Physiology*, 96(1), 44-49. <https://doi.org/10.1104/pp.96.1.44>
- Lim, J.H., Kim, J.C., Kim, K.J., Son, Y.S., Sunwoo, Y., Han, J.S. (2008) Seasonal variations of monoterpene emissions from *Pinus densiflora* in East Asia, *Chemosphere*, 73(4), 470-478. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.06.048>
- Lim, Y.J., Armendariz, A., Son, Y.S., Kim, J.C. (2011) Seasonal variations of isoprene emissions from five oak tree species in East Asia, *Atmospheric Environment*, 45(13), 2202-2210. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.066>
- Loreto, F., Nascetti, P., Graverini, A., Mannozi, M. (2000) Emission and content of monoterpenes in intact and wounded needles of the Mediterranean pine, *Pinus pinea*, *Functional Ecology*, 14(5), 589-595. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.t01-1-00457.x>
- McGarvey, D.J., Croteau, R. (1995) Terpenoid metabolism, *The Plant Cell*, 7(7), 1015. <https://doi.org/10.1105/tpc.7.7.1015>
- Monson, R.K., Lerdau, M.T., Sharkey, T.D., Schimel, D.S., Fall, R. (1995) Biological aspects of constructing volatile organic compound emission inventories, *Atmospheric Environment*, 29(21), 2989-3002. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00360-W](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00360-W)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) Annual report of air quality in Korea 2019. https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125
- Nunes, T.V., Pio, C.A. (2001) Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests, *Chemosphere-Global Change Science*, 3(3), 239-248. [https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(01\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(01)00007-1)
- Peñuelas, J., Staudt, M. (2010) BVOCs and global change, *Trends in plant science*, 15(3), 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.12.005>
- Pichersky, E., Gershenzon, J. (2002) The formation and function of plant volatiles: perfumes for pollinator attraction and defense, *Current Opinion in Plant Biology*, 5(3), 237-243. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(02\)00251-0](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(02)00251-0)
- Pierce, T.E., Waldruff, P.S. (1991) PC-BEIS: a personal computer version of the biogenic emissions inventory system. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 41(7), 937-941. <https://doi.org/10.1080/10473289.1991.10466890>
- Préndez, M., Corada, K., Morales, J. (2014) Natural organic compounds from the urban forest of the metropolitan region, Chile: Impact on air quality, *Volatile organic compounds*, 103-142.
- Seufert, G., Kotzias, D., Sparta, C., Versino, B. (1995) Volatile organics in Mediterranean shrubs and their potential role in a changing environment, In *Global change and Mediterranean-type ecosystems* (pp. 343-370), Springer, New York, NY, https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4186-7_17
- Sharkey, T.D., Loreto, F. (1993) Water stress, temperature, and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of kudzu leaves, *Oecologia*, 95(3), 328-333. <https://doi.org/10.1007/BF00320984>
- Son, Y.S., Hwang, Y.S., Sung, J.H., Kim, J.C. (2012) Variations of BVOCs emission characteristics according to increasing PAR, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(1), 77-85, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.1.077>
- Son, Y.S., Kim, J.C., Kim, K.J., Lim, Y.J., SunWoo, Y., Hong, J.H. (2006) A comparison study on isoprene emission rates from White Oak, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6), 791-798, (in Korean with English abstract).
- Son, Y.S., Kim, K.J., Jung, I.H., Lee, S.J., Kim, J.C. (2015) Seasonal variations and emission fluxes of monoterpene emitted from coniferous trees in East Asia: focused on *Pinus rigida* and *Pinus koraiensis*, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 72(1), 27-41. <https://doi.org/10.1007/s10874-015-9303-7>
- Steiner, A., Luo, C., Huang, Y., Chameides, W.L. (2002) Past and present-day biogenic volatile organic compound emissions in East Asia, *Atmospheric Environment*, 36(31), 4895-4905. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00584-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00584-8)
- Tingey, D.T. (1981) The effect of environmental factors on the emission of biogenic hydrocarbons from live oak and slash pine [*Pinus elliottii*, *Quercus virginiana*, USA].
- Tingey, D.T., Manning, M., Grothaus, L.C., Burns, W.F. (1979) The influence of light and temperature on isoprene emission rates from live oak, *Physiologia Plantarum*, 47(2), 112-118. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1979.tb03200.x>
- Tingey, D.T., Manning, M., Grothaus, L.C., Burns, W.F. (1980) Influence of light and temperature on monoterpene emission rates from slash pine, *Plant Physiology*, 65(5), 797-801. <https://doi.org/10.1104/pp.65.5>

797

- Went, F.W. (1960) Blue hazes in the atmosphere, *Nature*, 187 (4738), 641-643. <https://doi.org/10.1038/187641a0>
- Williams, J., Roberts, J.M., Fehsenfeld, F.C., Bertman, S.B., Buhr, M.P., Goldan, P.D., Hübler, G., Kuster, W.C., Ryerson, T. B., Trainer, M., Young, V. (1997) Regional ozone from biogenic hydrocarbons deduced from airborne measurements of PAN, PPN, and MPAN, *Geophysical Research Letters*, 24(9), 1099-1102. <https://doi.org/10.1029/97GL00548>
- Winer, A.M. (1983) Investigation of the role of natural hydrocarbons in photochemical smog formation in California, Statewide Air Pollution Research Center, Univer-

sity of California.

- Zimmerman, P.R. (1979) Testing of hydrocarbon emissions from vegetation, leaf litter and aquatic surfaces, and development of a methodology for compiling biogenic emission inventories.

Authors Information

- 유성지 (부경대학교 지구환경시스템과학부 석사과정)
손윤석 (부경대학교 환경공학과 조교수)