

총 설

자연적 휘발성유기화합물의 배출량 산정 정확도 향상을 위한 제언

Suggestions for Improving the Accuracy of Calculating Emissions of Natural Volatile Organic Compounds

옥다빈, 유성지¹⁾, 서서희, 최인영²⁾, 김조천²⁾, 선우 영²⁾, 유 철³⁾,
김형천³⁾, 손운석*

부경대학교 지구환경시스템과학부, ¹⁾부경대학교 공동실험실습관,
²⁾건국대학교 사회환경공학부, ³⁾국가미세먼지정보센터 배출량조사팀

Da-bin Ok, Seong-ji Yu¹⁾, Seo Hee Seo, In-young Choi²⁾, Jo-Chun Kim²⁾,
Young Sun-woo²⁾, Chul Yoo³⁾, Hyungcheon Kim³⁾, Youn-Suk Son*

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

¹⁾Center for Research Facilities, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

²⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

³⁾Emission Inventory Management Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea

접수일 2023년 8월 26일
수정일 2023년 9월 5일
채택일 2023년 9월 5일

Received 26 August 2023
Revised 5 September 2023
Accepted 5 September 2023

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

Abstract Volatile organic compounds (VOCs) are precursors that generate ozone and ultrafine dust through photochemical reactions in the ambient. These VOCs are classified according to their emission sources, and among them, natural VOCs (NVOCs) from plants such as trees account for about 80% of the total VOCs emissions. Due to the topographical characteristics of Korea, the ration of forests and urban forests is high, so emissions of highly reactive NVOCs can cause high concentrations of air pollution, so NVOCs emissions must be accurately estimated. Therefore, in order to increase the accuracy of NVOCs emission management, this study investigated the current status of calculating emissions of NVOCs at domestic and foreign, and identified problems with the domestic emission management system. As a result, it was confirmed that the factors that affect the accuracy of calculating emissions of NVOCs is emission rate, emission flux, emission factor, and source classification code (SCC). It was also confirmed that there was a great difference depending on the region, species, age of trees and measurement period (season). However, there is a problem in that study on these emission characteristics of NVOCs is very insufficient and the currently used code (SCC) does not match the current situation. In order to supplement these problems, a roadmap including solutions such as the development of a Korean model and the establishment of an integrated management system was prepared and presented. Furthermore, to accurately calculating domestic NVOCs emissions, it is judged that continuous study on the factors affecting NVOCs emissions should be conducted.

Key words: Natural volatile organic compounds, Emission rate, Emission flux, Emission factor, Source classification code

1. 서 론

휘발성유기화합물 (Volatile organic compounds, VOCs)은 대기 중 질소산화물 (NO_x)과 광화학산화반응을 통하여 지구온난화를 유발하는 오존 및 2차 유기 에어로졸을 생성한다(Fehsenfeld *et al.*, 1992). 오존은

인간의 건강에 영향을 미치는 대표적인 대기오염물질 중 하나로서, 지표 대기 중에 과도하게 존재할 때, 눈, 코, 호흡기 등에 강한 자극을 유발한다. 현재 국내의 오존 농도는 매년 증가하고 있는 추세이다. 질병관리청에 따르면 2019년 기준 10년간 대기 중 오존 농도 상승으로 인한 사망자 수가 2배 이상(1,248명(2010년)

→ 2,890명(2019년)) 증가한 것으로 보고되고 있다(KDCA, 2022; Yu and Son, 2021; NIER, 2019). 또한, VOCs에 의해 생성되는 초미세먼지도 대기질에 매우 악영향을 주므로 오존 및 초미세먼지의 전구물질인 VOCs의 관리와 정확한 배출량 산정이 절실히 요구된다.

VOCs는 배출원에 따라 인위적 휘발성유기화합물(Anthropogenic volatile organic compounds, AVOCs)과 자연적 휘발성유기화합물(Natural volatile organic compounds, NVOCs)로 구분된다. 이 중 NVOCs의 배출량은 전 지구적으로 약 1,089 TgC yr⁻¹로 추정되며, 자연적 발생량이 전체 VOCs 발생량의 약 80%를 차지한다(Guenther *et al.*, 2012; Dimitriadis, 1981).

NVOCs 배출원은 산림, 농경지, 도시림, 초지 등이 있다. 이 중 산림은 총 국토 면적 대비 약 63.2%를 차지하며 1인당 생활권 도시림 면적이 2017년에 비해 2021년에 14% 이상 증가하였다. 따라서 NVOCs 배출량은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다(KFS, 2021, 2017). 현재 국가 대기오염물질 배출량 산정에 있어서 NVOCs의 배출량은 제외되어 산정되고 있기 때문에, 미산정되고 있는 NVOCs에 대한 국가 배출량 산정 및 배출목록 작성이 절실히 요구된다. 그러나 현재까지는 외국에서 개발한 방법론을 국내에 적용하는 수준에서 배출량 산정이 이루어지고 있다.

지난 20여 년 동안 국내에서 배출량 산정에 필요한 배출속도 및 엽생체량 측정이 진행되어 국내 고유의 자료를 생성하였다. 그러나 현재까지 진행된 연구들은 일부 주요 수종과 지역을 대상으로 국한되어 있는 실정이다(Jung *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2014; Kim, 2013). 게다가 관련 모델링 분야의 연구 또한 국내에서는 매우 부족한 실정이다. 따라서 NVOCs 배출량 산정에 필요한 최신 배출량 산정 기법을 검토하고 배출량 산정에 필요한 기초자료의 제한적 요소를 극복하여 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 내 NVOCs 자료 신뢰도를 향상할 필요성이 있다. 또한 국내 현황에 맞는 NVOCs 배출계수 산정 모델링 기법을 조사하여 적합한 산정 방법을

도출할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 국내외에서 수행된 NVOCs 배출 관련 연구 결과들을 검토하여 국내 NVOCs 배출량 산정 시 발생할 수 있는 문제점들을 분석해 보았다. 그리고 이를 토대로 NVOCs 배출량 산정 정확도를 향상시키기 위해 앞으로 나아가야 할 방향에 대하여 논의하였다. 이에 따라 본 연구를 통해서 얻어진 결과는 향후 우리나라의 NVOCs 배출량 산정 정확도 향상과 오존 및 2차 대기오염물질의 생성량 파악 및 관리에 전반적으로 활용될 수 있을 것이다.

2. NVOCs의 관리 및 연구 동향

NVOCs의 배출량 산정의 정확도를 높이기 위해서는 우선적으로 현재까지 진행된 NVOCs의 관리 및 연구 동향을 파악할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 크게 NVOCs의 배출속도, 배출플럭스, 배출계수, 배출원 분류 코드와 같은 NVOCs의 배출량 산정 시 사용되는 기초자료의 현황을 조사하고 검토하였다.

2.1 배출속도

NVOCs의 배출속도는 단위 시간당 단위 건중량(gram dry weight, gdw)당 배출되는 탄소의 양($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)으로 표현된다(Yu and Son, 2021).

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

일반적으로 배출속도는 나무가 식재되어 있는 현장에서 직접 측정하는 방법과 실험실 내에서 수행하는 방법으로 나뉜다(Yu and Son, 2021). 국내의 경우, 수종별 배출량 산정을 위해 현장에서 나무 및 가지를 테트라백 등으로 감싸 농도를 측정하는 vegetation enclosure techniques (VET) 방식이 널리 사용되었으며, semi-static enclosures (Zimmerman, 1979)와 dyna-

Table 1. Standard emission rate of NVOCs studies conducted in domestic (Yu and Son, 2021).

Trees	ERs ($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Ref.
	Isoprene	Monoterpene	
<i>Carpinus laxiflora</i>	0.76	-	Kim and Lee (2012)
<i>Platanus orientalis</i>	67.011	-	Son et al. (2012)
<i>Prunus serrulata</i>	MDL	-	Son et al. (2012)
<i>Quercus acutissima</i> ¹⁾	1.16	-	Kim and Lee (2012)
<i>Quercus acutissima</i> ²⁾	0.038~0.062	-	Lim et al. (2011)
<i>Quercus aliena</i>	9.83~78.8	-	Lim et al. (2011)
<i>Quercus crispula</i>	12	-	Kim and Lee (2012)
<i>Quercus mongolica</i>	7.06~64.4	-	Lim et al. (2011)
<i>Quercus mongolica</i>	31.532	-	Son et al. (2012)
<i>Quercus serrata</i> ¹⁾	59.87	-	Kim and Lee (2012)
<i>Quercus serrata</i> ²⁾	101.4~130.5	-	Lim et al. (2011)
<i>Quercus variabilis</i>	0.035~0.092	-	Lim et al. (2011)
<i>Styrax japonica</i>	4.94	-	Kim and Lee (2012)
<i>Zelkova serrata</i>	MDL	-	Son et al. (2012)
<i>Abies holophylla</i>	-	1.89	Son et al. (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 et al. (2007b)
<i>Pinus densiflora</i>	-	1.734	Son et al. (2012)
<i>Pinus densiflora</i>	-	0.817~1.787	Lim et al. (2008)
<i>Pinus densiflora</i>	-	1.78	Kim and Lee (2010)
<i>Pinus koraiensis</i>	-	0.366	Son et al. (2012)
<i>Pinus koraiensis</i>	-	0.033~0.182	Son et al. (2015)
<i>Pinus rigida</i>	-	0.228~1.263	Son et al. (2015)
<i>Pinus thunbergia</i>	-	1.34	Kim and Lee (2010)
<i>Ginkgo biloba</i>	MDL	-	Son et al. (2012)

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

mic flow-throw chamber (Winer, 1983)의 단점을 보완한 Kim (2001)의 dynamic flow-through chamber 시스템이 국내의 연구에서 다수 사용된 것을 확인할 수 있었다(Ahn et al., 2022; Jung et al., 2021; Kim et al., 2020; Son et al., 2015, 2012, 2006; Lim et al., 2011; Lim et al., 2008; Kim et al., 2007a, 2007b).

위와 같은 방법을 통하여 측정된 배출속도는 측정 당시에 온도와 유효광합성량이 서로 다르기 때문에 환경적인 영향을 받을 수 있다. 따라서 이를 최소화하기 위하여 온도와 유효광합성량과 같은 인자들을 고려한 환경보정계수를 적용하여 30°C, 1,000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서의 표준배출속도(Standard emission rate, ERs)를 구하여 비교하는 것이 보다 바람직하다.

이러한 측정 방법과 환경보정식을 이용하여 산출된 국내 선행 NVOCs 배출속도 결과를 검토하였다. 현재까지 국내에서는 활엽수 11종, 침엽수 9종, 은행나무 1종으로 총 21수종에 대한 배출속도에 대한 연구가 수행되었다. 표 1은 국내에서 수행된 NVOCs의 ERs 결과를 나타낸 것이다. 활엽수의 이소프렌 ERs는 졸참나무(*Q. serrata*)가 가장 높은 값을 보였고, 이어서 갈참나무(*Q. aliena*), 버즘나무(*P. orientalis*), 신갈나무(*Q. mongolica*), 물참나무(*Q. crispula*), 때죽나무(*S. japonica*), 상수리나무(*Q. acutissima*), 서어나무(*C. laxiflora*), 굴참나무(*Q. variabilis*) 순으로 나타났다. 침엽수의 모노테르펜 ERs는 전나무(*A. holophylla*), 구상나무(*A. koreana*), 소나무(*P. densiflora*), 곰솔(*P.*

thunbergia), 리기다소나무 (*P. rigida*), 삼나무 (*C. japonica*), 낙엽송 (*L. leptolepis*), 편백 (*C. obtusa*), 잣나무 (*P. koraiensis*) 순으로 나타났다. 그리고 표에서도 알 수 있듯이 활엽수 및 침엽수 분류 안에서도 수종에 따른 이소프렌 및 모노테르펜의 배출속도는 매우 상이하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 여기서 언급한 연구 결과들은 모두 활엽수에서는 주로 이소프렌을 침엽수에서는 주로 모노테르펜만을 측정 및 분석한 결과들이었다.

선행 연구 결과에 따르면 수종별 수령에 따른 NVOCs의 배출량 차이가 상이한 것으로 보고되고 있다 (Yu and Son, 2021; Kim *et al.*, 2005; Nunes and Pio, 2001). Yu and Son (2021)에 따르면 활엽수종은 모두 수령이 적은 나무에서 배출속도가 높게 나타났었다 (Lim *et al.*, 2011). 침엽수의 경우 수령이 많을수록 소나무 (*P. densiflora*)의 모노테르펜 배출속도가 높았지만 (Lim *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2005), 이에 반해 리기다소나무 (*P. rigida*)는 수령이 적은 나무에서 더 높은 배출속도를 보이는 것으로 나타났다 (Son *et al.*, 2015).

계절적 변화가 뚜렷한 우리나라의 경우, 계절에 따른 NVOCs의 배출량 변화를 파악하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현재 국내에서 성목 (adult tree)에 대한 계절적 연구는 총 9개 수종에 대해서만 연구가 이루어진 상태이다. 그 외의 12개 수종은 단지 실험실 내에서 묘목을 대상으로 진행한 연구이다. 그림 1은 계절에 따른 국내 침엽수종 간 배출속도의 차이를 나타내고 있다. 침엽수의 모노테르펜 배출속도는 대부분 봄에 가장 높고 겨울에 가장 낮았다. 그러나 낙엽송 (*L. leptolepis*)의 경우에는 가을에 가장 높은 배출속도를 보이고 있었다. 그림 2는 국내 활엽수종의 계절에 따른 배출속도의 차이를 나타내고 있다. 그림 2에서 막대는 모노테르펜을 의미하고 표식은 이소프렌을 의미한다. 활엽수의 이소프렌 배출속도는 대부분의 종이 여름에 가장 높은 값을 보였다. 따라서 배출속도 및 ERs는 계절 및 수종에 따라 값의 차이가 뚜렷하므로 이를 고려한 배출량이 산정되어야 한다.

추가적으로 국내의 배출속도에 관한 연구 결과를

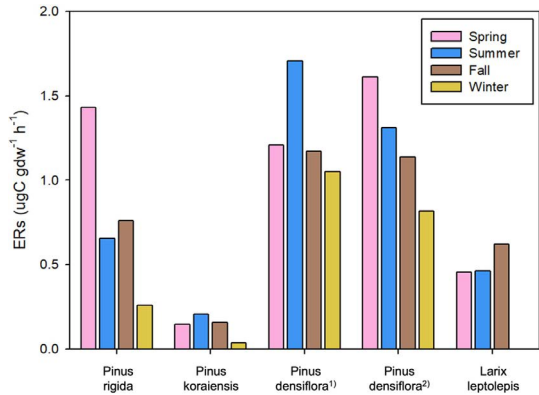


Fig. 1. Seasonal variations in monoterpene emitted from coniferous trees (¹⁾Sampling site: Gumsung mountains, ²⁾Sampling site: Worak mountains) (Yu and Son, 2021; Son *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2007b).

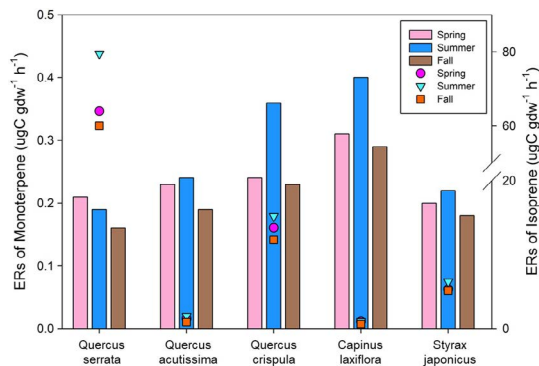


Fig. 2. Seasonal variations in emission rate of NVOCs from domestic broad-leaved trees (bar: Monoterpene, plot: Isoprene) (Yu and Son, 2021; Kim and Lee, 2012).

비교 및 분석하였다. 국외 결과는 국내에서 연구가 수행된 21개 수종에 대한 동일 수종만을 수집하였다. 참나무속 (*Quercus*)은 국내 산림의 15.4%이며, 전체 활엽수 중 48%를 차지하는 국내 산림의 주요 수종으로 연구가 가장 많이 이루어진 속이다. 미국의 경우 국내 수종과 다른 수종들이 식재되어 있어 국내 수종과의 직접적인 비교에 한계가 있었으나, 중국과 일본의 경우 국내와 동일한 수종에 대한 연구가 있어서 비교가 가능하였다 (표 2). 졸참나무 (*Q. serrata*)는 동일한 국가에서 연구가 수행된 경우에도 배출속도의 차이가

크게 나타났다. 국내의 경우 약 2배 차이가 났고 일본의 연구에서는 약 9배로 큰 차이를 보였다. 신갈나무 (*Q. mongolica*)의 국내와 중국의 배출속도 연구 결과는 약 10배 이상 차이가 나타났다. 이처럼 대부분의 연구 결과에서 동일한 수종이라도 연구가 진행된 나라에 따라서 그 결과가 매우 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 식물의 성장 등에 의한 NVOCs의 배출속도가 기후, 지역, 수령 등에 따라 매

우 달라질 수 있기 때문으로 추정된다.

소나무속(*Pinus*)은 전체 침엽수의 66.8%를 차지하는 소나무(*P. densiflora*)와 7.3%를 차지하는 잣나무(*P. koraiensis*)를 포함하는 주요 침엽수 속이다. 소나무의 경우, 국내에서 수행된 연구들의 배출속도는 비슷한 수준을 보이고 있었지만, 참나무속(*Quercus*)과 유사하게 국외 연구 결과와 큰 차이를 보이고 있었다. 일본 (Bao *et al.*, 2008)의 일부 연구 결과의 경우 소나무

Table 2. Isoprene emission rate of *Quercus*.

Genus	Species	Emission rate (ERs, $\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Location	Ref.
		Isoprene			
<i>Quercus</i>	<i>serrata</i>	59.87		Korea	Kim and Lee (2012)
		115.95 (101.4~130.5)		Korea	Lim <i>et al.</i> (2011)
		15~30		USA	Gara <i>et al.</i> (1993)
		224.21		Japan	Bao <i>et al.</i> (2008)
		24.7		Japan	Ohta (1986)
	<i>aliena</i>	44.3 (9.83~78.8)		Korea	Lim <i>et al.</i> (2011)
	<i>mongolica</i>	7.06~64.4		Korea	Lim <i>et al.</i> (2011)
		31.532		Korea	Son <i>et al.</i> (2012)
		348		China	Klinger <i>et al.</i> (2002)
	<i>crispula</i>	12		Korea	Kim and Lee (2012)
		26.04		Japan	Bao <i>et al.</i> (2008)
	<i>acutissima</i>	1.16		Korea	Kim and Lee (2012)
		0.05 (0.038~0.062)		Korea	Lim <i>et al.</i> (2011)
		0.18		Japan	Bao <i>et al.</i> (2008)
	<i>variabilis</i>	0.035~0.092		Korea	Lim <i>et al.</i> (2011)
65.5			China	Zhihui <i>et al.</i> (2003)	

Table 3. Monoterpene emission rate of *Pinus*.

Genus	Species	Emission rates ($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Location	Ref.
		Monoterpene			
<i>Pinus</i>	<i>densiflora</i>	1.734		Korea	Son <i>et al.</i> (2012)
		1.302 (0.817~1.787)		Korea	Lim <i>et al.</i> (2008)
		1.78		Korea	Kim and Lee (2010)
		0.15		USA	Martin <i>et al.</i> (1991)
		10.28		Japan	Bao <i>et al.</i> (2008)
		0.2		Japan	Yokouchi and Ambe (1984)
	<i>koraiensis</i>	0.366		Korea	Son <i>et al.</i> (2012)
		0.108 (0.033~0.182)		Korea	Son <i>et al.</i> (2015)
		0.26		China	Klinger <i>et al.</i> (2002)

Table 4. NVOCs emission rate of *Ginkgo*.

Genus	Species	Emission rates ($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Location	Ref.
		Isoprene	Monoterpene		
<i>Ginkgo</i>	<i>biloba</i>	MDL	-	Korea	Son <i>et al.</i> (2012)
		< 0.1	-	China	Xiaoshan <i>et al.</i> (2000)
		< 0.1	-	USA	Guenther <i>et al.</i> (1994)
		MDL OR < 1	-	USA	Kesselemer and Staudt (1999)
		-	3.0	Japan	Hatanaka (1993)
		0.01	-	China	Liu <i>et al.</i> (2022)
		0.00	-	Japan	Mochizuki and Tani (2021)
		< 0.01	0.2 ± 0.1	China	Wang <i>et al.</i> (2003)
		0.0017~0.43	-	China	Li <i>et al.</i> (2011)
		< 0.01	0.2 ± 0.1	China	Zhao <i>et al.</i> (2004)
	1.01	2.41	China	Gui (2019)	

Table 5. NVOCs emission rate of other trees.

Genus	Species	Emission rates ($\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Location	Ref.
		Isoprene	Monoterpene		
<i>Platanus</i>	<i>orientalis</i>	67.011	-	Korea	Son <i>et al.</i> (2012)
		25.2	-	China	Xiaoshan <i>et al.</i> (2000)
		20	-	USA	Gunether <i>et al.</i> (1994)
		10.9~27.5	-	USA	Kesselemer and Staudt (1999)
<i>Zelkova</i>	<i>serrata</i>	MDL	-	Korea	Son <i>et al.</i> (2012)
		< 0.01	0.42 (0.26~0.58)	USA	Curtis <i>et al.</i> (2014)
<i>Cryptomeria</i>	<i>japonica</i>	-	1.22	Korea	Kim and Lee (2010)
		-	2.81	Japan	Curtis <i>et al.</i> (2014)
<i>Chamaecyparis</i>	<i>obtusa</i>	-	0.52	Korea	Kim and Lee (2010)
		-	3.48	USA	Curtis <i>et al.</i> (2014)

(*P. densiflora*)가 국내 및 다른 선행 연구의 평균에 비해 약 11.2배 이상으로 매우 큰 값을 나타내고 있었다. 잣나무의 경우는 중국과 국내의 연구 결과가 유사하게 나타났다(표 3).

은행나무(*Ginkgo biloba*)는 전국의 가로수 중 약 11%를 차지하며, 산림에 비해 질소산화물과의 반응이 높은 도시림에 식재되어 상대적으로 오존생성가능성이 높은 수종이다. 그러나 은행나무에서 배출되는 이소프렌의 경우 Li *et al.* (2011)과 Gui (2019)를 제외한 모든 결과에서 검출한계 이하로 나타났으며, 검출된 두 결과에서도 미량으로 배출되었다(표 4). 모노

테르펜의 경우에도 Wang *et al.* (2003)과 Zhao *et al.* (2004)을 제외한 세 연구의 결과가 유사한 수준임을 확인할 수 있었다. 그 결과들을 종합적으로 볼 때, 은행나무는 전 세계적으로 NVOCs를 미량으로 배출하는 수종임을 확인할 수 있었다. 그 외 기타수종에 대한 배출속도 결과는 표 5와 같다.

2.2 배출플럭스

국내에서 배출속도가 측정된 21개 수종 중 9종에 대해서만 엽생체량이 실측되어 현재까지 배출플럭스가 산정되었다. 여기서 엽생체량은 Specific leaf weight

(SLW), Leaf area index (LAI)에 의해 산출된다. LAI의 경우 활엽수는 엽면적지수 측정기로 측정할 수 있으며, 침엽수는 바늘 모양의 엽면적을 측정하기 위해 Johnson (1984)이 고안한 방법을 사용하여 측정하고 있었다.

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

표 6은 국내에서 수종 9종의 배출속도와 엽생체량이 함께 고려된 배출플럭스 결과이다. 여름을 기준으로 침엽수의 배출플럭스는 소나무 (*P. densiflora*) > 리기다소나무 (*P. rigida*) > 낙엽송 (*L. leptolepis*) > 잣나무 (*P. koraiensis*) 순으로 나타났으며, 이는 ERs와 같

Table 6. Emission flux considering leaf biomass (Yu and Son, 2021).

Trees	Seasons	Emission flux ($\mu\text{gC m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	Ref.
<i>Pinus densiflora</i>	Summer	1,000.1	Lim et al. (2008)
	Winter	597.4	
<i>Pinus rigida</i>	Summer	381.9	Son et al. (2015)
	Winter	68.2	
<i>Larix leptolepis</i>	Summer	223.6	Kim et al. (2007b)
<i>Pinus koraiensis</i>	Summer	98.3	Son et al. (2015)
	Winter	19.7	
<i>Quercus serrata</i>		42,081	
<i>Quercus acutissima</i>		25,544	
<i>Quercus aliena</i>	Summer	32,702	Lim et al. (2011)
<i>Quercus mongolica</i>		24,111.5	
<i>Quercus variabilis</i>		14.42	

Table 7. Emission factors of major domestic trees (National air pollutant emission calculation method manual V).

Description	Species	Emission factor		
		Isoprene	Monoterpene	Other VOC
Deciduous forest	<i>Quercus mongolica</i>	27.304	0.0985	15.127
	<i>Quercus serrata</i>	47.679	0.0166	26.735
	<i>Quercus variabilis</i>	0.0169	0.00948	1.101
	<i>Quercus acutissima</i>	0.0288	0.0162	1.88
Plantation forest	<i>Pinus thunbergia</i>	0.0793	2.0876	1.2965
	<i>Pinus rigida</i>	0.0203	0.436	1.277
	<i>Larix leptolepis</i>	0.0431	0.0374	0.694

은 순서이다 (Yu and Son, 2021). 대부분의 배출플럭스는 여름이 겨울보다 높았다. 활엽수는 겨울에 잎이 없기 때문에 엽생체량 정보가 없어 여름 자료만 존재하며 배출플럭스는 졸참나무 (*Q. serrata*) > 갈참나무 (*Q. aliena*) > 신갈나무 (*Q. mongolica*) > 상수리나무 (*Q. acutissima*) > 굴참나무 (*Q. variabilis*) 순으로 나타났다 (Yu and Son, 2021).

2.3 배출계수

NVOCs의 배출계수는 수종별 단위 지표면당 오염물질 연간배출량을 의미하며, ERs와 엽생체량 (Foliar biomass density, FBD)의 곱으로 나타낸다. 이때, 각 물질별 배출속도는 실측 값을 표준상태로 환산한 값을 사용한다. 실제 편람에서 사용되고 있는 배출량 기본 산정식은 Guenther et al. (1993)이 제안한 식에 기초하고 있다.

$$\begin{aligned} \text{Emission flux} (\mu\text{gC m}^{-2} \text{h}^{-1}) \\ = \text{ERs} (\mu\text{gC gdw}^{-1} \text{h}^{-1}) \times \text{FBD} (\text{gdw m}^{-2} \text{area}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Flux} (\mu\text{g/m}^2/\text{yr}) = \int \epsilon \times D \times \gamma d \quad (4)$$

실제 국내에서 배출량을 산정하기 위하여 사용되는 배출계수를 확인하기 위하여 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람 내에서 배출계수의 현황을 검토하였다 (국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람 V) (표 7). 현재 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람은 V까지 나왔으며, 대부분의 수종의 NVOCs 배출

계수는 US EPA의 BEIS3 (Biogenic Emission Inventory System)의 배출계수를 사용하여 각 분류체계에 따라 이소프렌, 모노테르펜, Other VOCs와 같이 총 3가지의 NVOCs로 구분하여 적용되고 있었다(NAIR, 2022). 또한 일부 수종에 대해서는 국내에서 실측된 NIER(2010)의 배출계수가 반영되어 있다. 또한 일부 농경지의 경우에는 Birth and Geron (1995)의 배출계수로 변경되어 사용되고 있다. 그리고 이러한 배출계수는 2010년부터 2022년까지의 편람 안에서 모두 동일하게 유지되고 있어서 배출계수의 현행화를 이루어 지지 않고 있다.

실제로 국내의 배출원 분류코드(Source Classification Code, SCC) 중에서 국내에서 측정된 배출계수를 사용하는 코드는 약 총 9개이며 면적은 41,817 km²로 전체 산림면적의 약 82%를 차지한다. 따라서, 해당 자료에 사용된 NIER(2010)의 배출계수 연구 이후에 실측된 국내의 배출계수 연구 결과를 해당 분류체계에 적용한 결과, 12개 SCC의 배출계수를 국내 데이터로 추가적으로 업데이트할 수 있는 것을 확인하였다. 그리고 자체적으로 업데이트한 총 21개 SCC별 총 면적은 47,885 km²로 전체 산림면적의 약 94%를 포함할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 업데이트할 수 있는 수종의 배출계수들은 이소프렌, 모노테르펜, Other VOCs 세 종류에 대하여 모두 측정되지 않았거나, 두 개 이상의 배출계수 결과가 존재할 때 두 결과가 서로 상이한 문제점이 발견되었다.

이와 더불어, 우리나라의 식생종류별 면적분포를 확인했을 때, 도시림은 약 5,450 km²로 전체 자연적배출원의 약 7%로 적지 않은 면적을 차지하고 있다. 자연오염원의 소분류 중 ‘도시림’의 경우 이를 구성하는 수종이 매우 다양할 것으로 판단되지만, 세분류 없이 하나의 배출계수가 적용되어 있었다. 실제로 Jung *et al.* (2021)은 서울에 식재된 도시림 주요 5 수종(산벚나무(*P. sargentii*), 느티나무(*Z. serrata*), 은행나무(*G. biloba*), 주목나무(*T. cuspidate*), 메타세쿼이아(*M. glyptostroboides*))에 대하여 알데하이드 배출속도를 비교하였는데, 수종에 따라 다른 배출속도를 보이고

있었다. 이처럼 도시림 안에 포함되어 있는 다양한 수종의 NVOCs 배출속도가 상이할 것이다. 따라서 높은 식재 비율의 수종은 추가적으로 NVOCs의 배출속도를 면밀히 실측할 필요가 있고 SCC 내 도시림에 대한 분류를 보다 세부적으로 할 필요성이 있다.

국내 배출계수의 현행화를 위해 편람 안의 배출계수 데이터를 세부적으로 분석하였다. 낙엽활엽수림, 상록활엽수림, 침엽수림, 식재림에 대하여 이를 구성하는 전체 SCC 개수 대비 국내 결과가 적용된 SCC, 한 가지 물질이라도 표준 배출속도가 업데이트될 수 있는 SCC, biomass의 측정이 함께 이루어진 SCC, 앞으로 배출계수 업데이트가 가능한 SCC의 개수를 비교하였다. 낙엽활엽수림은 SCC 개수가 총 35개로 NIER(2010)의 국내 배출계수를 적용한 SCC는 5개였다. 그리고 이소프렌, 모노테르펜, Other VOCs 중 한 가지 물질이라도 배출속도 업데이트가 가능한 SCC는 총 10개이다. 활엽수는 이소프렌의 배출이 지배적이기 때문에, 이소프렌에 대한 연구만 수행되어 왔다. 그러나 모노테르펜 및 Other VOCs가 배출되는 경우도 있으므로, 추가적인 연구가 필요하다. 배출계수 산정을 위한 biomass의 연구가 이루어진 SCC는 총 5개로 기존 2010년에 업데이트된 수종과 동일하다. 결과적으로 배출계수를 업데이트할 수 있는 SCC는 이미 국내 데이터가 적용된 5개의 수종에서 이소프렌만 업데이트할 수 있었다. 또한, 국외의 배출계수를 적용한 경우 중복된 배출계수가 많았다(표 8). 따라서 대부분의 SCC가 수종 고유의 배출계수를 적용하지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 상록활엽수림의 경우 SCC 개수는 총 11개로 국내 배출계수 및 업데이트 가능한 SCC가 없었다. 또한, 물질별 배출계수 중복률이 상당히 높게 나타났다(표 8). BEIS3의 경우에도 국내와 같이 상록활엽수의 배출계수 연구가 최신화되지 않고 있었다. 이는 상록활엽수림이 전체 산림의 0.1%만을 차지하고 있기 때문이라고 판단된다. 침엽수의 SCC개수는 13개이며, 소나무(*P. densiflora*)와 잣나무(*P. koraiensis*)가 2010년 이후에 업데이트되었다. 이후에 한 가지 물질이라도 ERs를 업데이트할 수 있는 SCC

Table 8. Duplication rate of emission factors.

	VOCs classification	Emission factor	Duplicate count	Duplication rate
Deciduous forest	Isoprene	0.0431	25	71%
		29.75	3	9%
	Monoterpene	0.6007	5	14%
		0.0748	7	20%
		0.0374	13	37%
		1.1254	2	6%
	Other VOCs	0.694	28	80%
Evergreen broad-leaved forest	Isoprene	0.0431	9	82%
		29.75	2	18%
	Monoterpene	0.0748	3	27%
		0.0374	8	73%
	Other VOCs	0.694	11	100%
Coniferous trees	Isoprene	0.0793	4	31%
		0.17	5	38%
		0.0431	2	15%
	Monoterpene	4.5005	3	23%
		0.0374	3	23%
		2.1001	2	15%
	Other VOCs	1.2965	5	38%
		2.7782	4	31%
0.694		2	15%	
Plantation forest	Isoprene	29.75	2	11%
		5.9	1	-
		0.0431	9	50%
		0.17	2	11%
		0.0793	2	11%
	Monoterpene	0.0374	9	50%
		4.5005	1	-
		0.6902	2	11%
		2.0876	1	-
		2.1001	1	-
		0.3003	1	-
		1.1254	1	-
	Other VOCs	0.694	12	67%
		2.7782	2	11%
1.2965		2	11%	

는 소나무와 잣나무를 포함하여 5개로 확인되었다. 침엽수의 경우 대체로 모노테르펜을 배출하기 때문에, 모노테르펜의 배출속도에 대한 연구만 존재하는 것을 알 수 있었다. 침엽수림의 물질별 중복된 배출계

수는 각 물질별로 3개씩으로 상록활엽수림에 비하여 다양한 배출계수가 적용되고 있었다(표 8). 하지만 침엽수림은 전체 산림의 32.5%를 차지하기 때문에, 중복률의 최소화를 위한 추가적인 연구가 필요하다. 전

체 산림의 6%를 차지하는 식재림은 SCC 분류가 18개로 낙엽활엽수 다음으로 많은 세분류를 가지고 있다. 총 18개 중 2010년 이후 국내 데이터로 업데이트된 배출계수는 잣나무군락 (*P. koraiensis*)과 리기다소나무 (*P. rigida*) 2가지로 확인되었다. 이 중 잣나무군락은 앞선 침엽수림의 잣나무군락과 같은 배출계수를 사용하고 있었다. 2010년 이후 한가지 물질이라도 배출속도가 업데이트될 수 있는 SCC는 7개이며, 이 중 biomass 측정이 함께 이루어진 수종은 3개이다. 이때 7개 수종 모두 침엽수로 모노테르펜 결과만 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 국외의 배출계수를 적용한 경우 중복된 배출계수는 활엽수림, 침엽수림, 도시림에 비하여 가장 중복률이 낮고 다양한 배출계수가 적용되고 있다(표 8). 도시림은 SCC가 도시림과 기타 총 2가지로만 구분되어 있으며, 표 8과 같은 배출계수가 적용되어 있다. 이는 앞선 활엽수림, 침엽수림, 식재림과 동일하게 SCC를 세분화할 필요가 있으며, 주요 가로수종 등이 포함되어야 할 것으로 판단된다.

3. NVOCs 배출량 산정 정확도 향상을 위한 제언

3.1 NVOCs 배출량 산정 연구의 문제점 및 배출량 산정 정확도 향상을 위한 제언

현재까지 수행된 국내외 연구 자료만을 활용하여 정확한 NVOCs 배출량을 산정하기에는 앞에서 언급한 것과 같은 다양한 한계점이 존재한다. 따라서 NVOCs 배출량 산정의 정확도 향상을 위해서는 정확도에 영향을 미치는 분야의 지속적이고 체계적인 연구가 필요하다. 이를 더욱 구체적으로 파악하기 위하여 선행 NVOCs 배출량 산정 연구를 검토하여 NVOCs 배출량 산정 시 야기되는 문제점을 파악하였다. 그 결과, NVOCs 배출량 산정의 정확도에 영향을 미칠 수 있는 분야는 크게 배출속도 및 배출계수, 엽생체량, 모델링, 배출원분류코드로 분류할 수 있었다.

선행 국내외 배출속도 및 배출계수 연구 결과에 의

하면 같은 수종에서도 계절, 수령, 지역 등에 따라서 다양한 배출속도가 보고되고 있다. 또한 동일 수종 간에도 배출속도의 차이가 보고되고 있어서 각 수종의 계절별 다른 배출속도를 부여할 필요가 있으며, 이를 대표하는 값을 선정하는 기준에 대한 연구가 필요하다. 그리고 배출속도 산정 시 현재까지 국내의 연구들은 모두 특정 잎의 모양에 따라서 이소프렌과 모노테르펜 중심의 연구만 진행되었는데, CAPSS에 적용하기 위해서는 알데하이드 등의 Other VOCs에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 게다가 현재 주요 도시림 및 가로수 수종에서 배출되는 NVOCs에 대한 연구는 턱없이 부족한 실정이다. 현재까지 2~3 수종만이 성목을 대상으로 연구가 수행되었고, 대부분은 묘목에 대한 배출속도 연구만 이루어졌기 때문에 이를 CAPSS 및 모델링에 적용하기에는 한계가 있다.

앞서 언급한 대기오염물질 배출량 산정 편람상 배출계수의 현행화가 지난 10여 년간 이루어지지 않은 점에서 CAPSS 및 모델링 적용 시 불확도가 클 것으로 예상된다. 이를 위해서는 국내에서 배출속도가 측정되지 않은 수종에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한, 각 수종의 배출속도 자료가 부재한 상황에서 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람 내 SCC의 지나친 세분화는 NVOCs 배출량 산정에 혼란을 초래한다. 그리고 비슷한 수종끼리 동일한 배출계수를 사용하는 문제점 또한 해결 방안이 모색되어야 한다. 따라서 SCC 단순화 연구를 통한 SCC 검토 및 배출계수 등의 현행화가 필요하다.

국내에서는 엽생체량을 고려한 배출계수 산정이 미비한 실정이다. 국립산림과학원에서 제공하는 일부 상대성장식과 기존 위성 및 항공 사진에서 얻어진 LAI는 불확도가 높다. 따라서 현장 측정을 통해 국내 실정에 맞는 맞춤형 자료가 필요하다.

또한, 앞서 언급한 문제점을 해결하여 정확한 NVOCs 배출량 산정을 실현하려면 국가 NVOCs 통합관리 플랫폼 구축 사업이 필요하다. 이는 대기오염물질의 관리와 국민의 쾌적한 삶을 위한 기본권을 충

Field	Resolving Problem	Application-Diffusion	Development
Emission rates & Emission factor		Estimation of ER of major domestic species	
		Selection of Representative Values through Domestic and International ER	
Biomass		Other VOCs Measurement and Management	
		Biomass density measurement tailored to Domestic conditions	
Source Classification Code	Simplify of SCC	Simplify of Unban Forest in SCC	
Integrated Management Platform			Establishment of a NVOC Management Platform

Fig. 3. Strategic roadmap for managing NVOCs emissions.

족시킬 수 있다. 또한, 위에 제언한 연구들이 효율적으로 진행되기 위해서는 체계적이고 과학적인 중장기 연구 로드맵이 필요하다.

3.2 NVOCs 배출 및 관리 전략 로드맵

지난 10여 년 이상 거의 전무했던 NVOCs 관련 연구를 보다 효율적으로 진행하기 위해서는 현안해결, 적용·확산, 성장·선점과 같은 단계적인 추진이 필요하다. 현안해결이란 빠른 시일 내에 현재의 기술 및 연구력으로 추진할 수 있는 사항으로 국내 주요 수종의 배출속도 도출 및 기존 모델을 활용한 배출량 개선 등이 있다. 적용·확산은 현재의 기술력으로는 어렵지만, 현안해결에서 도출된 결과를 통하여 향상시킬 수 있는 단계이다.엽생체량 관련 자료의 목록화 및 NVOCs를 위한 한국형 모델의 개발 등이 있다. 마지막 성장·선점에서는 세계적인 기술력 확보 및 확산을 위해 통합관리 플랫폼 구축과 같은 NVOCs 관리 시스템의 구축 등을 예로 들 수 있다.

따라서, 당장 해결할 수 있는 단기해결 문제와 지속적으로 연구가 필요한 장기 연구의 구분이 필요하다. 예를 들어, SCC의 단순화 및 도시림의 세분화는 선행 연구 자료의 검토를 통하여 우선적으로 수행되어야

한다. 이를 이용하여 주요 수종 등을 선정할 수 있어서 관련 연구 예산의 효율성을 극대화할 수 있다. 그러나, 수종 또는 속별 VOCs 배출속도의 산정은 오랜 기간 추진되어야 하는 연구로서 단계적이고 지속적인 연구가 요구된다. 위와 같은 내용들을 바탕으로 향후 추가적인 실측 연구 등을 통해 개선이 필요한 배출속도, 엽생체량 등과 주기적으로 변경이 요구되는 기상인자, 환경인자, 기후인자 등과 같은 자료를 현시점에 맞게 적용할 수 있는 향후 연구 방향 등을 수립한 로드맵의 제시가 필요하다.

4. 결 론

현재 미세먼지와 같은 대기오염물질은 TMS (Tele Monitoring System) 및 대기질 측정망을 통하여 실시간으로 관리되고 있다. 그러나 NVOCs에 대한 관리는 전무한 실정이다. 이에 국민들의 건강한 삶을 위해 향후 주요 산림 및 도시림 지역의 NVOCs도 일반 대기오염물질과 같은 관리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 정확한 NVOCs 배출량 산정을 위하여 선행 NVOCs 배출량 산정과 관련된 연구 결과들을 검토하

였다. 그 결과, 현재까지 NVOCs 배출량 산정 연구는 미흡하며, NVOCs 배출량 산정을 위한 배출속도 및 배출계수가 지역별, 국가별, 계절별, 수종별 큰 차이를 나타내는 것을 볼 수 있었다. 게다가 확보한 자료에 비하여 배출원분류코드가 너무 세분화되어 이용자에게 오히려 혼돈을 야기시킬 수 있는 실정이다. 향후 NVOCs 관리를 위하여 국내에 알맞은 배출계수와 배출원분류코드에 대한 추가적이고 체계적인 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 또한, 본 연구에서 제시한 국내 NVOCs 배출량 산정 정확도 향상을 위한 로드맵은 국가 NVOCs 배출에 대한 관리와 정책 수립에 초석이 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2023년도 부산녹색환경지원센터의 연구사업비 지원을 받아 수행하였습니다(23-1-40-41). 이 성과는 환경부 산하 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Ahn, J.W., Dinh, T.V., Park, S.Y., Choi, I.Y., Park, C.R., Son, Y.S. (2022) Characteristics of biogenic volatile organic compounds emitted from major species of street trees and urban forests, *Atmospheric Pollution Research*, 13(7), 101470. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101470>
- Bao, H., Kondo, A., Kaga, A., Tada, M., Sakaguti, K., Inoue, Y., Shimoda, Y., Narumi, D., Machimura, T. (2008) Biogenic volatile organic compound emission potential of forests and paddy fields in the Kinki region of Japan, *Environmental Research*, 106(2), 156-169. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2007.09.009>
- Birth, T.L., Geron, C.D. (1995) User's guide to the personal computer version of the biogenic emission inventory system.
- Curtis, A.J., Helmig, D., Baroch, C., Daly, R., Davis, S. (2014). Biogenic volatile organic compound emissions from nine tree species used in an urban tree-planting program, *Atmospheric Environment*, 95, 634-643. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.035>
- 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>
- Fehsenfeld, F.C., Calvert, J.G., Fall, R., Goldan, P.D., Guenther, A., Hewitt, C.N., Lamb, B., Liu, S., Trainer, M., Westberg, H., Zimmerman, P.R. (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>
- Gara, M.A., Woolfolk, R.L., Cohen, B.D., Goldston, R.B., Allen, L.A., Novalany, J. (1993) Perception of self and other in major depression, *Journal of Abnormal Psychology*, 102(1), 93-100. <https://doi.org/10.1037/0021-843x.102.1.93>
- Guenther, A., 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., Zimmerman, P.R., Wildermuth, M.C. (1994) Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. 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)
- 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>
- Gui, L. (2019) Estimation of Volatile Organic Compounds Emissions and Ozone Formation Potential in Xi'an City Master thesis. Northwest University, Xi'an, China.
- Hatanaka, A. (1993) The biogeneration of green odour by green leaves, *Phytochemistry*, 34(5), 1201-1218. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(91\)80003-j](https://doi.org/10.1016/0031-9422(91)80003-j)
- 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>
- Jung, Y., Son, Y., Park, S., Choi, I., Ahn, J.Y., Son, J., Oh, C., Dinh, T., Kim, J. (2021) Variations of aldehyde emission from representative tree species in urban forests by cli-

- mate change, *Atmospheric Environment*, 262, 1186-1196. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118616>
- 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, G.W., Kwon, C.Y., Yeom, D.G., Joung, D.W., Choi, Y.H., Park, B.J. (2014) Relationship between NVOCs Concentration and Korean Red Pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) Forest Environment in Spring Season, *Journal of the Korean Forestry Society*, 103(3), 483-489. <https://doi.org/10.14578/jkfs>
- 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., Lee, K. (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, H.C. (2013) Characteristic of Biogenic VOCs Emission and the Impact on the Ozone Formation in Jeju Island.
- Kim, J.C. (2001) Development of a Novel Sampling Technique for Natural VOC Emissions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 17(E2), 61-70.
- Kim, 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, J.H., SunWoo, Y., Park, H.J., Cho, K.T. (2007b) Study on natural VOC emission rates and characteristics emitted from *Larix Leptoleis* (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, 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, 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>
- 840
- Klinger, L.F., Li, Q.J., Guenther, A.B., Greenberg, J.P., Baker, B., Bai, J.H. (2002) Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China, *Journal of Geophysical Research*, 107(D21), ACH 16-21. <https://doi.org/10.1029/2001jd001076>
- Korea Disease Control and Prevention Agency (KDCA) (2022) https://www.kdca.go.kr/board/board.es?mid=a20501000000&bid=0015&list_no=719063&cg_code=&act=view&nPage=1
- Korea Forest Service (KFS) (2017, 2021) Urban forest statistics 2017, 2021.
- Li, D.W., Shi, Y., He, X.Y., Chi, G.Y. (2011) Seasonal Variations of BVOCs Emission from *Ginkgo biloba* Linn in Urban Area, *Applied Mechanics and Materials*, 71-78, 2891-2894. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.71-78.2891>
- 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>
- Liu, L., Seyler, B.C., Liu, H., Zhou, L., Chen, D., Liu, S., Yan, C., Yang, F., Song, D., Tan, Q., Jia, F., Feng, C., Wang, Q., Li, Y. (2022) Biogenic volatile organic compound emission patterns and secondary pollutant formation potentials of dominant greening trees in Chengdu, southwest China, *Journal of Environmental Sciences-China*, 114, 179-193. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.08.033>
- Martin, R.S., Westberg, H., Allwine, E., Ashman, L., Farmer, J.C., Lamb, B. (1991) Measurement of isoprene and its atmospheric oxidation products in a central Pennsylvania deciduous forest, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 13(1), 1-32. <https://doi.org/10.1007/bf00048098>
- Mochizuki, T., Tani, A. (2021) Emissions of gaseous formic and acetic acids from major tree species in Japan, *Atmospheric Environment*, 247, 118149.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022) <https://www.air.go.kr/main.do>
- National air Pollutant Emission Calculation Method Manual I, II, III, IV, V.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2010)

- Development of Natural VOC Emission Factor and Improvement of Emission Calculation Method.
- 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)
- Ohta, K. (1986) Diurnal and seasonal variations in isoprene emission from live oak, *Geochemical Journal*, 19(5), 269-274. <https://doi.org/10.2343/geochemj.19.269>
- 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>
- Wang, Z.H., Zhang, S.Y., Lu, S.H., Bai, Y.H. (2003) Screenings of 23 plant species in Beijing for volatile organic compound emissions, *Chinese Journal of Environmental Science*, 24, 7-12.
- Winer, A.M. (1983) Investigation of the role of natural hydrocarbons in photochemical smog formation in California, *Statewide Air Pollution Research Center, University of California*.
- Xiaoshan, Z., Yujing, M., Wenzhi, S., Yahui, Z. (2000) Seasonal variations of isoprene emissions from deciduous trees, *Atmospheric Environment*, 34(18), 3027-3032. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00311-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00311-8)
- Yokouchi, Y., Ambe, Y. (1984) Factors Affecting the Emission of Monoterpenes from Red Pine (*Pinus densiflora*), *Plant Physiology*, 75(4), 1009-1012. <https://doi.org/10.1104/pp.75.4.1009>
- Yu, S.J., Son, Y.S. (2021) A review on characteristics of biogenic volatile organic compounds emitted from major tree species in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 695-709, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.695>
- Zhao, J., Bai, Y.H., Wang, Z.H., Zhang, S.Y. (2004) Studies on the emission rates of plants VOCs in China. *China Environmental Science*, 24, 15-18.
- Zhihui, W., Yuhua, B., Shuyu, Z. (2003) A biogenic volatile organic compounds emission inventory for Beijing, *Atmospheric Environment*, 37(27), 3771-3782. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00462-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00462-X)
- 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

옥다빈 (부경대학교 지구환경시스템과학부 학부과정)
(dabin0619@naver.com)

유성지 (부경대학교 공동실험실습관 연구원)
(sjyu@pknu.ac.kr)

서서희 (부경대학교 지구환경시스템과학부 박사과정)
(seseoheee@naver.com)

최인영 (건국대학교 환경공학과 박사과정)
(force@konkuk.ac.kr)

김조천 (건국대학교 사회환경공학부 교수)
(jckim@konkuk.ac.kr)

선우영 (건국대학교 사회환경공학부 교수)
(ysunwoo@konkuk.ac.kr)

유철 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)
(s7424yoo@korea.kr)

김형천 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사)
(khcwing@korea.kr)

손윤석 (부경대학교 지구환경시스템과학부 부교수)
(sonys@pknu.ac.kr)