



국내 수종별 BVOCs 방출량(II): 도시 숲 주요 수종

장한나¹ · 손정아¹ · 김주완² · 김준혁² · 김영성² · 최원실² · 이영규¹ ^{2*}

¹국립산림과학원 도시숲연구과, ²서울대학교 농생명과학공동기기원

Emission Rates of Biogenic Volatile Organic Compounds from Various Tree Species in Korea (II): Major Species in Urban Forests

Hanna Chang¹, Jounga Son¹, Juwan Kim², Junhyuk Kim²,
Yeongseong Kim², Won-Sil Choi² and Young-Kyu Lee¹ ^{2*}

¹Urban Forests Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

²National Instrumentation Center for Environmental Management,
Seoul National University, Seoul 08826, Korea

요약: 식물체에서 isoprene, monoterpene, sesquiterpene과 같은 화합물들 형태로 방출되는 피톤치드를 포함한 VOCs를 총칭하여 생물유래 휘발성유기화합물 BVOCs (biogenic volatile organic compounds)로 구분하고 있다. 피톤치드는 중요한 산림치유 인자인 동시에 질소화합물과 광화학반응을 하여 오존 및 이차 유기에어로졸 생성에 영향을 미치는 물질로 보고되고 있다. 본 연구에서는 우리나라 도시숲 주요 32 수종을 선정하여 3년생 이하 묘목을 연구 대상으로 표준환경조건(온도: 30°C, 광도: 1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)에서 400 L Tedlar bag을 순환형 챔버를 이용하여 도시숲 주요 수종에서 방출되는 기체시료를 포집하여 열탈착-GC/MS로 분석하였다. 해당 수종의 잎을 건조시켜 건조량 당 수종별 isoprene 및 terpene류 38종의 방출량을 분석하였다. Isoprene 방출량은 전체 수종 중에서 신갈나무에서 가장 높게 나타났으며 버드나무, 아까시나무, 왕버들이 주요 isoprene 방출 수종으로 분류되었다. Monoterpene 방출량은 스트로브잣나무가 가장 높았으며 참죽나무, 박태기나무가 주요 monoterpene 방출 수종으로 나타났다. Monoterpene 주요 물질은 α -pinene, myrcene, camphene, limonene 이었으며, oxygenated monoterpene의 주요 물질은 eucalyptol이었다. Oxygenated sesquiterpene에서는 caryophyllene oxide가 주요 물질로 검출되었지만 32개 수종에서 sesquiterpene과 oxygenated sesquiterpene의 방출량은 상대적으로 낮았다.

Abstract: In this study, the isoprene and terpene emissions from 32 major urban tree species were investigated. We conducted sampling using a dynamic enclosure system between June and July 2021. Seedlings aged < three years were enclosed in a chamber consisting of a 400 L transparent Tedlar bag. The air flow from the outlet of the chamber was sampled using Tenax-filled sorbent tubes under standard conditions (temperature: 30°C; PAR: 1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$). A thermal desorption gas chromatography/mass spectrometry system was used to analyze the following 38 biogenic volatile organic compounds: isoprene, monoterpenes, sesquiterpenes, oxygenated monoterpenes, and oxygenated sesquiterpenes. Isoprene emitters included *Quercus mongolica*, *Salix koreensis*, *Robinia pseudoacacia*, and *Salix chaenomeloides*. Monoterpene emitters included *Pinus strobus*, *Cedrela sinensis*, and *Cercis chinensis*. The monoterpene emission profiles were dominated by α -pinene, myrcene, camphene, and limonene. The predominant oxygenated monoterpene and oxygenated sesquiterpene were eucalyptol and caryophyllene oxide, respectively. For all species, the contributions of sesquiterpenes and oxygenated sesquiterpenes were relatively low.

Key words: BVOCs, isoprene, terpene, emission rate

서론

도시숲은 국민의 보건 휴양·정서함양 및 체험활동 등을 위하여 조성·관리하는 산림 및 수목으로 공원, 마을 숲, 경관숲, 학교숲, 가로수 등이 해당하며 도시숲 조성은 국·공유지의 미활용, 저활용 토지를 활용하여 소거점 역

* Corresponding author

E-mail: woodlee9@snu.ac.kr

ORCID

Young-Kyu Lee  https://orcid.org/0000-0002-3133-8050

할 등 도시생태계 건강성 유지 및 국민의 삶의 질 향상에 기여하고 있다.

도시지역 내 국민들이 쉽게 이용할 수 있는 ‘생활권 도시림’은 2019년 e-나라지표 전국 도시숲 현황(Statistics Korea)에 의하면 전국 평균 11.51 m²/인으로 세계보건기구(WHO)의 1인당 권고 기준(9 m²)을 달성하였으나 산림 선진국에 비해 부족한 실정이며, 미세먼지, 도시열섬 현상 등의 조기분산 및 저감에 도시숲의 필요성이 확대되고 있다. 최근 도시림면적(생활권도시림면적 포함)은 2015년 46,219 ha, 2017년 47,318 ha, 2019년 54,354 ha로 증가하고 있으며 이는 혁신도시 조성, 행정구역 승격(면에서 읍)을 비롯한 생활숲, 가로수 등 도시숲 조성사업 활성화로 증가 추세를 보이고 있다.

산림을 활용한 인간의 건강증진에 대한 요구도가 매년 증가하고, 산림치유 관련 정책과 공간이 조성되면서 산림치유 공간을 조성하기 위한 기술개발이 필요하다. 이에 따라 숲의 여러 가지 치유인자들 중에서 수목에서 방출되는 휘발성물질인 피톤치드(phytoncide)에 대한 관심이 높아지고 있다. 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 상온 및 상압에서 대기 중으로 가스형태로 쉽게 휘발되는 탄화수소화합물이며 VOCs는 인위적인 발생원에서 방출되는 인위기원 VOCs (anthropogenic VOCs, AVOCs)와 자연 발생원에서 방출되는 자연기원 VOCs (natural VOCs, NVOCs)로 구분할 수 있다. NVOCs 중 식물체에서 isoprene, monoterpene, sesquiterpene과 같은 화합물들 형태로 방출되는 피톤치드를 포함한 VOCs를 총칭하여 생물유래 휘발성유기화합물 BVOCs (Biogenic Volatile Organic Compounds)로 구분하고 있다(Park et al., 2021).

BVOCs에 포함되어 있는 피톤치드는 삼림욕 물질로써 최근 산림욕의 효과와 피톤치드의 기능에 대한 효능연구가 의학, 심리학 등 다양한 분야에서 진행되고 있으며 건강과 관련한 관심이 증가하고 있다.

한편 도시대기 오염문제 중 오존과 광화학스모그 형성에 VOCs가 관여하는 것으로 알려지면서 오존의 생성과 관련있는 오존전구물질(C_{2m} ~ C₁₂ 범위의 탄화수소 성분)에 대한 관심이 증가하고 있다(Cheong and You, 2010).

또한 대부분의 BVOCs의 경우 대기 중에서 체류기간이 짧고 반응성이 높아 NO_x의 발생이 높은 지역에서는 오존 발생에 대한 기여도 증가와 대기의 주요 산화제(OH, O₃, NO₃)와의 높은 반응성으로 이차유기 에어로졸(SOA; secondary organic aerosol)을 형성하여 대기질에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Wu et al., 2020; Ding et al., 2014; Bonn et al., 2017).

국내에서 BVOCs의 방출량은 총 431,000톤/년으로

AVOCs의 방출량(723,000톤/년)의 약 60% 정도가 방출되는 것으로 추정하고 있다(Lee et al., 2014). 2020년 한국 임업통계연보(Statistical Yearbook of Forestry, 2020)에 따르면 우리나라 산림면적은 2019년 6,299,276 ha로 전체면적의 약 62.7%가 산림지역인 상황이지만 자연 발생원에 의한 VOCs 방출에 대한 정보는 미흡하다. 또한 국내의 방출량 산정작업에서는 미국 EPA에서 제공하는 방출계수를 적용하고 있다. 따라서 우리나라의 실제적인 생육환경이 반영된 방출계수가 아닌 외국의 자료들을 적용하여 BVOCs 방출을 산정함으로써 우리의 현실을 반영한 평가를 하는데 한계가 있다(Lee et al., 2014). 따라서 BVOCs의 방출특성을 파악하기 위해서는 국내에 식재되어 있는 나무의 종류와 주요 환경인자에 따른 방출속도를 비교할 필요성이 있다(Yu and Son, 2021). 본 연구의 선행연구에서는 우리나라 도시숲에 분포하는 주요 30 수종을 선정하여 표준환경조건(온도: 30°C, 광도: 1,000 μmol/m²/sec)에서 순환형 챔버를 이용하여 수종별 isoprene 및 terpene류의 수종별 방출량을 분석하였다. 선행연구(1차년도) 결과, isoprene 방출량은 왕대(*Phyllostachys bambusoides*)에서 가장 높게 나타났으며 졸참나무(*Quercus serrata*), 굴거리나무(*Daphniphyllum macropodum*), 회양목(*Buxus koreana*) 순으로 나타났다. Monoterpenes 방출량은 리기다소나무(*Pinus rigida*)에서 가장 높게 나타났으며 고로쇠나무(*Acer pictum*), 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*), 백목련(*Magnolia denudata*), 메타세쿼이아(*Metasequoia glyptostroboides*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 소나무(*Pinus densiflora*), 전나무(*Abies holophylla*) 순으로 나타났다. 총 oxygenated monoterpenes의 방출량은 섬잣나무(*Pinus parviflora*), 리기다소나무, 고로쇠나무, 중국단풍(*Acer buergerianum*), 조팝나무(*Spiraea prunifolia*) 순으로 나타났다. Sesquiterpenes의 방출량은 리기다소나무에서 가장 높았고, 총 oxygenated sesquiterpenes의 방출량은 단풍나무(*Acer palmatum*), 왕대 순으로 나타났다(Chang et al., 2021).

이에 본 연구에서는 도시숲 주요 30수종의 BVOCs 방출량을 분석한 선행연구(1차년도)의 후속연구(2차년도)로 추가적으로 주요 32수종을 선정하여 선행연구 방법과 동일하게 BVOCs 방출량을 분석하여 도시숲 수종을 대상으로 isoprene 주요 방출 수종과 terpene 주요 방출 수종으로 분류하고자 한다.

재료 및 방법

1. 수종 선정

국내 주요 조경 및 조림 수종, 지피식물 중에서 식재 본

수, 수목 형태(상록, 낙엽) 및 크기(교목, 관목)와 도시 숲 내 중요성, 보편성, 수급용이성 등을 고려하여 도시숲 주요 32 수종을 선정하였으며 3년생 이하 묘목을 연구 대상으로 하였다(Table 1). 묘목은 침엽수/활엽수용 상토를 넣고 화분(25 cm × 25 cm × 25 cm)에 식재하였다. BVOCs 측정 2일 전 묘목에 동일한 양의 관수를 한 후 표준환경조건(온도: 30°C, 광도: 1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)으로 유지되는 챔버에 넣고 순화시켰으며 선행연구(1차년도)와 동일하게 진행시켰다(Chang et al., 2021).

2. BVOCs 방출 계수 분석을 위한 순환형 챔버 장치

묘목에서 방출되는 BVOCs 시료를 채취하기 위해서 챔버 내부가 표준환경조건이 유지되고, 화분을 포함하여 묘목 전체를 챔버 안에 넣을 수 있도록 1 m × 2 m, 400 L Tedlar bag를 제작하여 고순도 Air를 사용하는 순환형 챔버(dynamic flow through chamber) 시스템을 구축하였다(Figure 1).

챔버의 배경농도는 고순도 Air를 300 L 채운 후, 밀폐하여 표준환경조건에서 30분간 노출시킨 후 챔버 내부의 공

Table 1. Summary of enclosure sampling conditions dry leaf weight, leaf surface temperature and relative humidity.

Species Scientific name (Korea name)	Dry leaf weight (g)	Leaf surface Temp. (°C)	Relative humidity (%)
<i>Abelia x grandiflora</i> (Rovelli ex André) Rehder (꽃댕강나무)	10.1±1.2	30.3±0.4	52.6±1.8
<i>Acer triflorum</i> Kom. (복자기)	36.0±1.1	27.1±0.4	55.0±6.9
<i>Aesculus turbinata</i> Blume (칠엽수)	3.1±1.1	36.2±1.6	42.8±4.0
<i>Aria alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) Decne. (팔배나무)	9.8±1.7	29.1±2.1	54.4±3.6
<i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i> (Miq.) H. Hara (자작나무)	8.7±0.6	30.2±0.9	47.9±1.9
<i>Camellia japonica</i> L. (동백나무)	20.7±1.8	32.4±0.4	50.0±1.8
<i>Castanea crenata</i> Siebold & Zucc. (밤나무)	27.8±13.3	29.9±2.7	57.9±7.9
<i>Cedrela sinensis</i> Juss. (참죽나무)	5.5±3.2	31.2±3.7	49.1±1.8
<i>Cedrus deodara</i> (Roxb. ex D.Don) G.Don (개잎갈나무)	49.4±4.4	29.5±0.7	69.4±3.3
<i>Celtis sinensis</i> Pers. (팽나무)	7.7±3.8	27.9±1.6	56.6±6.6
<i>Cercis chinensis</i> Bunge (박태기나무)	5.2±1.6	31.0±1.8	37.8±5.7
<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl. (편백)	19.5±2.1	31.2±1.9	61.2±1.9
<i>Chamaecyparis pisifera</i> (Siebold & Zucc.) Endl. (화백)	41.6±5.6	31.8±2.5	63.5±10.3
<i>Chionanthus retusus</i> Lindl. & Paxton (이팝나무)	4.7±0.8	30.0±1.3	45.3±5.4
<i>Cornus kousa</i> Bürger ex Hance (산딸나무)	7.4±4.1	31.7±2.5	55.0±6.9
<i>Euonymus alatus</i> (Thunb.) Siebold (화살나무)	23.0±3.0	34.1±3.0	68.9±1.0
<i>Fraxinus rhynchophylla</i> Hance (물푸레나무)	7.3±0.6	27.8±1.7	43.2±1.4
<i>Hibiscus syriacus</i> L. (무궁화)	7.0±1.8	30.6±2.0	61.7±1.5
<i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm. (모감주나무)	8.6±1.5	27.9±1.2	48.6±3.6
<i>Lagerstroemia indica</i> L. (배롱나무)	5.6±1.2	29.0±1.7	54.8±2.4
<i>Ligustrum obtusifolium</i> Siebold & Zucc. (취통나무)	8.1±2.2	30.6±1.6	46.8±3.1
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. (백합나무)	13.6±3.7	28.5±0.8	57.4±1.7
<i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc. (후박나무)	4.3±0.2	29.1±1.5	49.4±2.0
<i>Pinus strobus</i> L. (스트로브잣나무)	28.0±12.6	30.0±0.3	62.2±4.8
<i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton (돈나무)	30.0±10.0	30.6±0.6	46.0±1.9
<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb. (신갈나무)	9.6±3.3	33.6±3.1	50.5±6.4
<i>Robinia pseudoacacia</i> L. (아까시나무)	14.9±2.8	28.0±0.8	53.5±1.9
<i>Salix chaenomeloides</i> Kimura (왕버들)	12.6±4.2	31.0±2.0	66.7±5.2
<i>Salix koreensis</i> Andersson (버드나무)	9.2±6.3	26.9±0.3	50.5±6.4
<i>Sorbus commixta</i> Hedl. (마가목)	9.1±3.8	25.5±1.3	47.6±1.6
<i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc. (때죽나무)	6.4±2.5	30.6±1.2	55.7±3.9
<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino (느티나무)	11.6±0.7	29.3±1.1	52.8±1.4



Figure 1. Chamber system for BVOCs sampling.

기를 채취하여 분석하였다. 배경농도를 측정 후 챔버 내부의 고순도 air를 모두 제거하고 해당 묘목과 온·습도계를 설치하고 표준환경조건에서 고순도 Air 유량을 약 3~4 L/min로 주입하여 배출구에서 약 2~2.5 L/min 유량이 유지된 후 60분 동안 유지시켰다.

3. BVOCs 시료 포집 및 분석 방법

본 연구에서 분석대상 BVOCs 물질은 isoprene (ISO)과 terpene류로 구분하였고 terpene 물질은 기존 연구논문을 참고하여(Ortega and Helmig 2008; Yaman et al., 2015; Chen et al., 2020) monoterpenes (MT) 13종류, oxygenated monoterpenes (OMT) 13종류, sesquiterpenes (ST) 5종류, oxygenated sesquiterpenes (OST) 6종류로 구분하여 총 38개 BVOCs 성분을 분석하였다(Table 2).

Isoprene과 terpene의 검정곡선을 위한 표준흡착관 제작과 정량분석 방법은 실내공기질공정시험기준의 실내 및 건축자재에서 방출되는 휘발성유기화합물 측정 방법-고체흡착관과 기체크로마토그래프-MS/FID법(ES 02602.1d)을 이용하였다. 휘발성분 포집에 사용된 Tenax TA 흡착관(Supelco, USA)은 사용 전 흡착관 컨디셔너(APK1200, KNR, Korea)를 이용하여 300°C에서 4시간 컨디셔닝 실시 후 사용하였다.

Isoprene 표준물질(59240-1ML-F, Sigma-Aldrich), terpene 표준물질(CAN-Terp-Mix 1&2, SPEX Certiprep, USA)을 사용한 흡착관 제조는 표준물질 흡착장치(CT1100, CHEMTEKINS, Korea)를 이용하여 200°C에서 고순도 He gas를 100 mL/min 유속으로 조절하여 액체 표준물질이 기화될 수 있는 조건에서 농도별로 제조하였다. Isoprene 표준물질, terpene 표준물질과 챔버에서 기체시료를 포집

한 흡착관은 열탈착(ATD)-GC/MS (Tubomatrix 350 - Clarus 680/Clarus SQ8T, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 Table 3과 4의 분석조건과 selected ion monitoring (SIM) mode로 분석하였다. 분석에 사용된 SIM mode의 ionization mode와 retention time 정보는 표준물질 목록과 함께 Table 2에 나타냈다.

수종별 isoprene과 terpene 시료 채취는 동일수종 3개체를 개별 챔버를 사용하여 동시에 표준환경조건에서 노출시킨 후 각각의 챔버에서 Tenax TA 흡착관과 시료채취 펌프(MP-Σ30, SIBATA, Japan)를 사용하여 100 mL/min의 유속으로 10분 동안 1 L 포집하였다. 모든 수종의 BVOCs 시료는 2021년 6월~7월, 오전 11:00~14:00에 포집하였다.

4. 건중량당 BVOCs 방출량

수종별 표준환경조건에서의 BVOCs 방출량(ER: emission rate)은 Ortega and Helmig(2008)가 보고한 식을 사용하여 실측한 수종별 BVOCs 농도와 챔버 배경농도, 챔버에서 배출되는 공기유량과 잎 건중량을 고려하여 다음의 식으로 건중량당 BVOCs 방출량을 계산하였다. 잎은 65°C에서 향량이 될 때까지 건조시킨 후 건중량을 측정하였다(Table 1).

$$ER_{BVOCs} = Q(C_{\text{sample chamber}} - C_{\text{empty chamber}}) / g_{dw}$$

ER_{BVOCs}: BVOCs 방출량 ng/(g_{dw}·hr)

Q: 챔버 배출 유속 (m³/hr)

C_{sample chamber}: 챔버 내부의 수종별 BVOCs 농도 (ng/m³)

C_{empty chamber}: 챔버 배경 농도

g_{dw}: BVOCs 시료 채취 후 수종별 잎의 건중량 (g)

Table 2. List of standard compounds.

Group	Compound	Retention time (RT)	Ionization mode (EI+)
Isoprene (ISO)	Isoprene	6.43	67+68+53
	α -Pinene	21.65	93+136
Monoterpene (MT)	Camphene	22.38	93+136
	Sabinene	23.04	93+136
	Myrcene	23.28	69+93
	β -Pinene	23.4	69+93
	β -Phellanderene	24.24	93+136
	3-Carene	24.39	136
	α -Terpinene	24.59	93+121+136
	Limonene	25.05	68+93
	r-Terpinene	25.98	93+136
	Terpinolene	26.99	93+121+136
	Cymene	24.84	119+134
	Ocimene	28.04	105+121+136
	Oxygenated Monoterpene (OMT)	Camphor	29.36
Terpineol		30.57	59+93+136
Eucalyptol		25.28	93+139+154
Borneol		29.87	95+110+139
Menthol		30	81+138
Sabinene hydrate		28.46	93+121+136
Linalool		27.08	93+121+136
D-Fenchone		27.28	69+81
Fenchyl alcohol		28.28	81+111+121
Isopulegol		29.17	121+136+154
Nerol		31.14	41+69+93
Pulegone		31.98	81+109+152
Geraniol		31.79	69+41
Sesquiterpene (ST)	Caryophyllene	37.47	133+175
	α -Cedrene	37.59	119+161
	α -Humulene	38.5	80+93+147
	Farnesene	39.2	69+93+161
	Valencene	39.36	161+189+204
Oxygenated Sesquiterpene (OST)	cis-Nerolidol	39.51	69+93+161
	trans-Nerolidol	40.35	69+161+189
	Caryophyllene oxide	41.92	79+93+121
	Guaiol	42.15	161+189+204
	Cedrol	43.23	95+150
	α -Bisabolol	44.71	93+109+119

Table 3. Analytical conditions of thermal desorption system for determination of BVOCs.

Items		ATD Conditions
Split ratio		10 : 1
Carrier GAS and TDS flow		He (99.999%), 1ml/min
Desorption temperature program	Initial temperature	30°C (holding 3min)
	Final temperature	60°C/min, 280°C, (holding 5min)
CIS temperature program	Initial temperature	-30°C (holding 5min)
	Final temperature	12°C/min, 280°C, (holding 5min)
Transfer line temperature		300°C

Table 4. Analytical conditions of GC/MS for determination of BVOCs.

Items		GC/MSD Conditions
Split ratio		Split 10:1
Detector		MS Clarus SQ8T (PerkinElmer)
Column		Elite-5MS (PerkinElmer) (60.0m × 320 μ m × 1 μ m)
Carrier GAS and Column flow		He (99.999%), 1ml/min
Temperature program	Initial temperature	50°C (5min)
	Heating rate	5°C/min, 220°C, (holding 10min)
	Final temperature	10°C/min, 250°C, (holding 5min)
MS Condition	MS Source temperature	230°C
	MS Quad temperature	150°C
	Mode	EI
	Ionization energy	70 eV
	Detection mode	TIC (scan), m/z: 35 ~ 350

결과 및 고찰

1. Isoprene 방출량

Isoprene은 주로 활엽수종에서 방출되며 활엽수는 BVOCs를 저장하지 않고 바로 광합성 작용을 통해 BVOCs를 방출하는 특성이 있으며(Kim et al., 2015), 온도와 PAR 변화에 따라 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Harrison et al., 2001; Xiaoshan et al., 2000).

공시수종을 표준환경조건에서 건중량 당 isoprene, monoterpenes, oxygenated monoterpenes, sesquiterpenes, oxygenated sesquiterpenes 방출량 측정결과를 Table 5에 나타냈다. 수종별 방출량은 신갈나무(*Quercus mongolica*) 113,563 ± 4,799 ng/(g_{dw}·hr)에서 가장 높게 나타났다. 버드나무(*Salix koreensis*) 91,430 ± 2,338 ng/(g_{dw}·hr), 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*) 64,875 ± 6,800 ng/(g_{dw}·hr), 왕버들(*Salix chaenomeloides*) 36,459 ± 9,788 ng/(g_{dw}·hr) 순으로 나타났으며 그 외 수종들은 200 ng/(g_{dw}·hr) 미만으로

나타났다. 또한 isoprene 방출량이 높은 신갈나무, 버드나무, 아까시나무, 왕버들의 terpenes 성분의 방출량은 50 ng/(g_{dw}·hr) 미만으로 매우 낮게 나타났다. 따라서 이들 수종들은 측정한 32 수종 중에서 주요 isoprene 방출 수종으로 분류되었다.

이번 연구에서는 신갈나무가 가장 높은 isoprene 방출량을 나타냈으며 본 연구진의 선행연구에서는 졸참나무(*Quercus serrata*)의 isoprene 방출량이 높은 것으로 보고되었다(Chang et al., 2021). 따라서 1차, 2차년도 연구결과 참나무 수종에서는 졸참나무와 신갈나무가 isoprene 주요 방출수종으로 분류되었다(Table 6). 월악산과 금성산에서 측정된 연구에서는 국내 대표적인 참나무 수종인 신갈나무, 졸참나무(*Q. serrata*), 갈참나무(*Quercus aliena*), 상수리나무(*Quercus acutissima*), 굴참나무(*Quercus variabilis*)의 봄, 여름, 가을 계절별 isoprene 방출량을 측정하고 졸참나무가 가장 높은 방출량을 나타냈으며, 갈참나무, 신갈나무 순으로 나타냈다(Lim et al., 2011). 이와 같이

Table 5. Emission rate of isoprene, monoterpenes, sesquiterpenes, oxygenated monoterpenes and oxygenated sesquiterpenes for tree species in dry weight of leaves (g_{dw}) and standard condition (30°C, 1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$). ISO is isoprene, TM is total monoterpenes, TOM is total oxygenated monoterpenes, TS is total sesquiterpenes, TOS is total oxygenated sesquiterpenes.

Scientific name	Emission rate per leaves dry weight ($\text{ng}/(\text{g}_{dw}\cdot\text{hr})$)				
	ISO	TM	TOM	TS	TOS
<i>A. x grandiflora</i>	64.1±10.4	59.7±39.6	8.0±7.5	N.D.	0.5±0.4
<i>A. triflorum</i>	80.0±69.0	49.0±45.7	1.9±1.4	N.D.	22.8±20.1
<i>A. turbinata</i>	13.7±10.2	17.1±12.3	6.0±3.6	0.6±0.5	1.4±1.3
<i>A. alnifolia</i>	35.3±4.0	4.8±2.9	3.6±3.0	N.D.	7.5±5.9
<i>B. platyphylla</i>	38.7±10.9	38.2±26.7	5.5±2.4	0.2±0.1	N.D.
<i>C. japonica</i>	11.1±4.5	10.9±7.8	6.5±4.2	0.6±0.5	0.5±0.4
<i>C. crenata</i>	28.9±14.1	4.6±1.5	5.0±4.8	N.D.	2.5±1.5
<i>C. sinensis</i>	72.4±27.7	155.2±52.8	38.6±20.2	0.1±0.1	0.6±0.5
<i>C. deodara</i>	14.2±10.0	26.2±8.7	0.3±0.2	N.D.	0.4±0.2
<i>C. sinensis</i>	71.4±43.5	15.0±7.7	3.7±2.6	N.D.	0.4±0.3
<i>C. chinensis</i>	65.9±60.9	51.4±29.8	47.8±42.6	8.1±5.9	6.5±5.0
<i>C. obtusa</i>	26.8±17.4	14.6±7.1	1.3±0.6	0.2±0.1	1.7±1.6
<i>C. pisifera</i>	28.7±6.5	34.9±7.0	0.1±0.0	N.D.	1.4±1.1
<i>C. retusus</i>	159.6±158.5	22.3±12.3	6.4±5.0	1.8±1.5	7.8±6.1
<i>C. kousa</i>	65.4±40.7	50.1±39.6	1.8±1.4	N.D.	3.7±2.5
<i>E. alatus</i>	19.9±7.0	3.8±0.4	0.5±0.3	N.D.	0.1±0.1
<i>F. rhynchophylla</i>	22.9±20.1	36.3±15.5	31.1±9.1	0.2±0.1	18.5±3.9
<i>H. syriacus</i>	43.9±26.1	22.1±10.7	12.9±9.9	4.1±2.8	2.5±1.9
<i>K. paniculata</i>	5.8±4.9	51.7±41.2	2.1±1.4	N.D.	5.0±4.2
<i>L. indica</i>	15.9±8.0	37.0±31.7	4.1±2.8	N.D.	0.3±0.2
<i>L. obtusifolium</i>	83.0±35.3	20.2±19.8	8.2±7.9	2.3±2.1	2.5±1.4
<i>L. tulipifera</i>	126.3±112.7	43.5±27.9	28.0±12.5	N.D.	7.4±7.0
<i>M. thunbergii</i>	26.0±4.8	25.6±16.4	28.1±10.1	N.D.	1.2±1.0
<i>P. strobus</i>	3.9±3.4	7,520±1,987	55.5±10.9	N.D.	72.7±10.6
<i>P. tobira</i>	12.4±2.2	6.5±2.2	1.8±1.4	N.D.	0.1±0.1
<i>Q. mongolica</i>	113,562±4,799	41.3±12.4	0.9±0.7	0.2±0.1	4.3±4.0
<i>R. pseudoacacia</i>	64,875±6,800	14.9±7.1	32.8±21.0	N.D.	N.D.
<i>S. chaenomeloides</i>	36,459±9,788	7.8±3.9	10.3±7.2	0.7±0.2	1.1±0.1
<i>S. koreensis</i>	91,430±2,338	7.7±6.7	0.6±0.4	N.D.	7.2±6.9
<i>S. commixta</i>	47.9±41.2	33.5±23.9	18.7±17.9	N.D.	3.6±3.4
<i>S. japonicus</i>	6.3±5.3	4.2±2.5	25.3±22.6	N.D.	1.9±1.7
<i>Z. serrata</i>	38.4±7.8	18.9±12.7	5.0±3.4	N.D.	1.5±1.0

Table 6. Isoprene emission rate and segmentation.

Isoprene emission rate range ($\text{ng}/(\text{g}_{dw}\cdot\text{hr})$)	Species	
	1 st year research results	2 nd year research results
100,000 <		<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.
50,000 < ~ ≤ 100,000		<i>Salix koreensis</i> Andersson <i>Robinia pseudoacacia</i> L.
10,000 < ~ ≤ 50,000	<i>Phyllostachys bambusoides</i> Siebold & Zucc.	<i>Salix chaenomeloides</i> Kimura
5,000 < ~ ≤ 10,000	<i>Quercus serrata</i> Thunb. ex Murray <i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.	
1,000 < ~ ≤ 5,000	<i>Buxus koreana</i> Nakai ex Chung & al.	

동일 속일지라도 종에 따라서 방출량에 차이가 나타났다. 기존 연구에서는 이러한 결과는 토양이나 기후 등 수목의 서식환경에 따라 방출량에서 차이를 보이는 것으로 추정하였지만 본 연구에서는 동일한 서식환경과 수령을 고려한다면 종에 따른 방출특성으로 판단되었다.

버드나무의 isoprene 방출량은 $91,430 \pm 2,338 \text{ ng}/(\text{g}_{\text{dw}} \cdot \text{hr})$ 으로 나타났지만 monoterpene 방출량은 $7.7 \pm 6.7 \text{ ng}/(\text{g}_{\text{dw}} \cdot \text{hr})$ 로 낮은 방출량을 나타냈다. 이와 같은 결과는 휴대용 광합성 측정기 챔버에 버드나무 잎을 넣고 BVOCs를 측정할 결과 버드나무에서는 높은 isoprene이 배출되고 개체별 편차도 크게 나타났지만 monoterpene 배출량은 매우 낮은 것으로 보고된 연구와 동일한 경향을 나타냈다(Karlsson and Rinnan, 2020).

또한 버드나무류(*Salix spp.*, *Salix nigra*, *Salix phylicifolia*, *Salix discolor*, *Salix humulis*, *Salix petiolaris*, *Salix subsericea*)에서 isoprene 방출량 측정을 위해서 잎의 온도 30°C , PAR $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ 에서 cuvette을 이용한 측정, 가지와 잎을 포함하여 챔버에 넣어서 측정한 연구에서도 isoprene 방출량은 다른 수종과 비교해서 상대적으로 높은 방출량을 나타냈다(Geron and Harley, 2001).

본 연구에서 아까시나무의 isoprene 방출량은 전체 수종에서 3번째 높은 수종으로 나타났다. 이와 같은 결과는 30°C , $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ 조건에서 cuvette system과 GC를 이용한 isoprene 방출량 분석 연구에서 아까시나무는 양버즘나무(*Platanus occidentalis*), 사시나무(*Populus spp.*)와 함께 주요 isoprene 방출량 수종으로 보고한 결과와 유사한 경향을 나타냈다(Geron and Harley, 2001).

이와 같이 isoprene의 방출량이 높은 신갈나무, 버드나무, 아까시나무, 왕버들에서는 monoterpenes, oxygenated monoterpenes, sesquiterpenes, oxygenated sesquiterpenes의 방출량의 총합인 total terpene의 방출량이 $15.0\sim 48.0 \text{ ng}/$

$(\text{g}_{\text{dw}} \cdot \text{hr})$ 로 상대적으로 낮게 나타났다. Isoprene 방출량이 높은 수종은 terpene 방출량이 낮았는데 이와 같은 경향은 1차년도 결과에서도 동일하게 나타났다.

선행연구(1차년도) 30수종과 후속연구(2차년도) 32수종의 isoprene 방출량 $1,000\sim 100,000 \text{ ng}/(\text{g}_{\text{dw}} \cdot \text{hr})$ 구간을 5단계 범위로 구분하여 Table 6에 나타났다. 전체 62수종 중에서 8수종을 주요 isoprene 방출 수종으로 구분할 수 있었다.

2. Terpene 방출량

Monoterpene은 주로 침엽수에서 방출되는 것으로 알려져 있으며 침엽수는 활엽수와는 달리 광합성을 하면 바로 BVOCs가 방출되지 않고 잎에 저장되어 있다가 방출되는 특성이 있다(Laffineur et al., 2011). Monoterpenes 방출량을 분석한 결과(Table 5), 스트로브잣나무(*Pinus strobus*)에서 $7,520 \pm 1,987 \text{ ng}/(\text{g}_{\text{dw}} \cdot \text{hr})$ 으로 가장 높게 나타났다. 스트로브잣나무의 monoterpene 주요 물질로는 α -pinene, myrcene, camphene이 검출되었다(Figure 2). 이와 같은 결과는 스트로브잣나무를 수고별 2단계로 구분하여 잎을 채취한 후 추출방법으로 BVOC 방출량을 단위 질량당 분석한 연구에서 α -pinene, β -pinene, camphene이 주요 물질로 방출되고 monoterpene이 sesquiterpene 보다 높은 방출량을 나타낸 것으로 보고한 연구와 유사한 경향을 보였다(Toma and Bertman, 2012).

참죽나무의 monoterpene 방출량은 $155.2 \pm 52.8 \text{ ng}/(\text{g}_{\text{dw}} \cdot \text{hr})$ 으로 2차년도 전체 수종 중에서는 두 번째 높은 방출량을 나타냈지만, 절대적인 방출량은 낮았다. 참죽나무의 잎을 건조 조건별로 VOC를 측정할 연구에서는 진공건조에서 caryophyllene이 가장 많은 비율을 차지하고 있었다

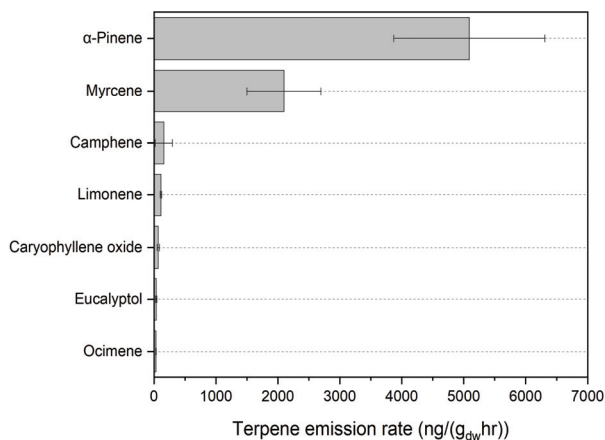


Figure 2. Terpene emission rate from Pinus strobus.

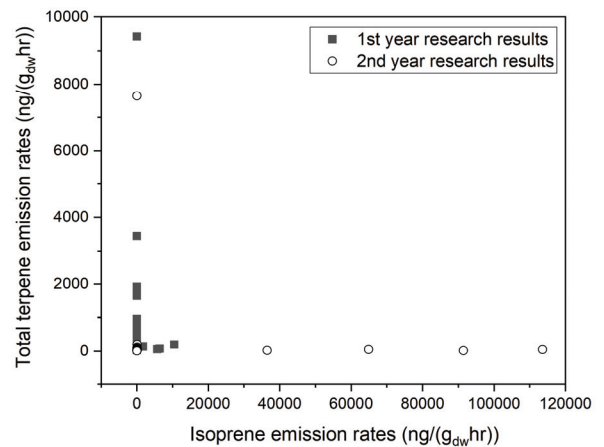


Figure 3. Total terpene versus isoprene emission rate of 1st and 2nd year results.

(total terpene: monoterpene + oxygenated monoterpene + sesquiterpene + oxygenated sesquiterpene emission rate)

(Chen et al., 2010). 본 연구에서는 BVOC 중 limonene의 비율이 가장 높았는데, 이와 같은 차이는 건조 후 잎과 생리활성 중에 방출되는 측정환경에서 나타나는 차이인 것으로 판단된다.

Monoterpenes, oxygenated monoterpenes, sesquiterpenes, oxygenated sesquiterpenes 방출량을 모두 합하여 총 terpene과 isoprene 방출량 관계를 Figure 3에 나타냈다.

수종별 BVOCs 방출 특성을 비교하면 terpene과 isoprene을 일정 수준 이상 동시에 방출하는 수종은 없었다. Terpene 방출량이 높으면 isoprene 방출량이 낮았고, isoprene 방출량이 높으면 terpene 방출량이 낮았으며 terpene과 isoprene 방출량이 모두 낮은 수종이 가장 많은 것으로 분

석되었다. 따라서 terpene 방출 수종, isoprene 방출 수종, BVOCs 저방출 수종으로 구분할 수 있었다. Isoprene 주요 방출 수종은 1차 30개 수종 중에서는 왕대, 졸참나무, 굴거리나무, 회양목, 2차 32개 수종 중에서는 신갈나무, 버드나무, 아까시나무, 왕버들로 나타났다. Terpene 주요 방출 수종은 총 방출량을 기준으로 총 5단계로 100 ng/(g_{dw}·hr) 이하 39수종, 100 초과 500 ng/(g_{dw}·hr) 이하 14수종, 500 초과 1,000 ng/(g_{dw}·hr) 이하 잣나무, 소나무, 전나무 3수종, 1,000 초과 5,000 ng/(g_{dw}·hr) 이하 고로쇠, 일본잎갈나무, 백목련, 메타세콰이아 4수종, 5,000 ng/(g_{dw}·hr) 초과 리기다소나무, 스트로브잣나무 2수종으로 구분 할 수 있었다 (Table 7).

Table 7. Total terpene emission rate and segmentation.

Total terpene emission rate range (ng/(g _{dw} ·hr))	Species	
	1 st year research results	2 nd year research results
5,000 <	<i>Pinus rigida</i> Mill.	<i>Pinus strobus</i> L.
1,000 < ~ ≤ 5,000	<i>Acer pictum</i> Thunb. var. <i>mono</i> (Maxim.) Maxim. ex Franch.	
	<i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carrière	
	<i>Magnolia denudata</i> Desr. <i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu & W.C.Cheng	
500 < ~ ≤ 1,000	<i>Pinus koraiensis</i> Siebold & Zucc. <i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	
	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	
100 < ~ ≤ 500	<i>Pinus parviflora</i> Glauca Group	<i>Cedrela sinensis</i> Juss.
	<i>Abies holophylla</i> Maxim.	<i>Cercis chinensis</i> Bunge
	<i>Spiraea prunifolia</i> Siebold & Zucc. f. <i>simpliciflora</i> Nakai	
	<i>Rhododendron mucronulatum</i> Turcz.	
	<i>Acer buergerianum</i> Miq.	
	<i>Phyllostachys bambusoides</i> Siebold & Zucc.	
	<i>Pyracantha angustifolia</i> (Franch.) C.K.Schneid.	
	<i>Betula schmidtii</i> Regel	
	<i>Cornus officinalis</i> Siebold & Zucc.	
	<i>Ulmus parvifolia</i> Jacq.	
	<i>Buxus koreana</i> Nakai ex Chung & al.	
<i>Ilex crenata</i> 'Convexa'		
≤ 100	<i>Quercus variabilis</i> Blume	<i>Fraxinus rhynchophylla</i> Hance
	<i>Juniperus chinensis</i> L.	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.
	<i>Quercus serrata</i> Thunb. ex Murray	<i>Acer triflorum</i> Kom.
	<i>Forsythia koreana</i> (Rehder) Nakai	<i>Abelia x grandiflora</i> (Rovelli ex André) Rehder
	<i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.	<i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm.
	<i>Ginkgo biloba</i> L.	<i>Sorbus commixta</i> Hedl.
	<i>Kerria japonica</i> (L.) DC	<i>Cornus kousa</i> Bürger ex Hance
	<i>Quercus acutissima</i> Carruth.	<i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc.
	<i>Euonymus japonicus</i> Thunb.	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.
	<i>Prunus x yedoensis</i> Matsum.	other 20 species

Table 8. Terpene emission rate of *Pinus rigida* Mill. and *Pinus strobus* L.

Group	Compound	<i>Pinus rigida</i> Mill. (ng/(g _{dw} ·hr))	<i>Pinus strobus</i> L. (ng/(g _{dw} ·hr))
Monoterpene (MT)	α-Pinene	4,014.5±1,549.6	5,089.1±1,218.7
	Camphene	98.7±86.0	157.4±136.1
	Sabinene	13.5±5.0	29.5±13.1
	Myrcene	2,726.1±1,212.7	2,096.4±597.5
	β-Pinene	857.1±1,465.1	N.D.
	β-Phellanderene	5.1±2.3	3.1±1.4
	3-Carene	30.4±45.1	1.1±0.1
	α-Terpinene	1.6±0.8	0.1±0.2
	Limonene	739.3±1,249.7	112.2±11.3
	r-Terpinene	2.6±0.8	0.8±0.3
	Terpinolene	3.7±3.3	3.8±2.1
	Cymene	0.0±0.0	0.0±0.0
	Ocimene	9.4±3.8	30.5±5.1
	Oxygenated Monoterpene (OMT)	Camphor	9.4±5.9
Terpineol		17.1±10.3	1.6±0.2
Eucalyptol		1.0±10.4	34.7±12.5
Borneol		1.4±1.4	N.D.
Menthol		N.D.	N.D.
Sabinene hydrate		N.D.	5.6±5.7
Linalool		9.5±9.0	N.D.
D-Fenchone		2.4±8.1	0.7±1.0
Fenchyl alcohol		1.3±1.5	N.D.
Isopulegol		N.D.	N.D.
Nerol		5.5±12.5	2.3±0.5
Sesquiterpene (ST)	Pulegone	20.3±57.5	16.3±1.4
	Geraniol	0.4±0.2	N.D.
	Caryophyllene	30.9±31.3	21.2±5.0
	α-Cedrene	6.4±8.5	N.D.
	α-Humulene	7.1±7.2	N.D.
Oxygenated Sesquiterpene (OST)	Farnesene	12.0±20.1	1.5±2.1
	Valencene	N.D.	N.D.
	cis-Nerolidol	7.1±7.3	0.1±0.2
	trans-Nerolidol	0.5±6.3	0.2±0.2
	Caryophyllene oxide	N.D.	67.9±17.8
	Guaiol	0.0±0.1	N.D.
	Cedrol	0.4±0.2	0.3±0.4
	α-Bisabolol	N.D.	7.4±3.5

Table 8에는 1차년도와 2차년도 terpene 방출량 분석결과 각각 가장 높은 방출량을 나타낸 리기다 소나무와 스트로브 잣나무의 terpene 개별물질의 방출량을 나타냈다. Monoterpene류에서는 공통적으로 α-pinene, myrcene, limonene 순으로 방출량이 높았지만 β-pinene의 경우에는 리기다 소나

무에서만 높은 방출량을 나타냈다. Oxygenated monoterpene류에서는 수종별 차이가 나타났다. 리기다 소나무에서는 pulegone, terpineol, linalool, camphor 순으로 방출량이 높았으며 스트로브 잣나무에서는 eucalyptol, pulegone, sabinene hydrate가 주요 물질로 나타났다. Sesquiterpene류에

서는 공통적으로 caryophyllene의 방출량이 가장 높았으며, Oxygenated Sesquiterpene류에서는 스트로브 잣나무의 caryophyllene oxide 방출량이 높게 나타났다.

결론

본 연구에서는 우리나라 도시숲에 분포하는 주요 32 수종을 선정하여 표준환경조건(온도: 30°C, 광도: 1,000 $\mu\text{mol/m}^2/\text{sec}$)에서 순환형 챔버를 이용하여 수종별 isoprene 및 terpene류의 수종별 방출량을 분석하였다.

Isoprene 방출량을 분석한 결과 신갈나무에서 가장 높게 나타났고 버드나무, 아까시나무, 왕버들 순으로 나타났으며 그 외 수종에서는 상대적으로 매우 낮은 방출량을 나타냈다. Monoterpenes 방출량은 스트로브잣나무가 가장 높았고, 참죽나무, 박태기나무 순으로 나타났으며 oxygenated monoterpenes의 방출량과 sesquiterpenes의 방출량이 높은 수종은 없었다. Oxygenated sesquiterpenes의 방출량은 스트로브잣나무가 가장 높았지만 대부분의 수종에서는 낮은 방출량을 나타냈다.

본 연구 결과를 기준으로 하여 향후 추가적으로 도시숲 수종을 대상으로 isoprene 주요 방출 수종과 5구간으로 분류된 terpene 주요 방출 수종의 데이터베이스 구축을 진행할 예정이다. 본 연구에서 제시된 도시숲 주요 수종의 BVOCs 방출 특성은 국내 최초로 많은 수종을 대상으로 DB를 구축했다는 점에서 큰 의의가 있으며, 이와 더불어 수종별 생태적, 심미적, 환경내성적 특성을 고려하여 도시숲 조성을 위한 수종 선정 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 대기오염물질 저감을 위한 식물의 메커니즘 및 기능향상 연구(과제번호: FE0000-2018-01-2021)의 일부로 진행되었습니다.

References

- Bonn, B., Kreuzwieser, J., Sander, F., Yousefpour, R., Baggio, T. and Adewale, O. 2017. The uncertain role of biogenic VOC for boundary-layer ozone concentration: Example investigation of emissions from two forest types with a box model. *Climate* 5(4): 78-99.
- Chang, H., Son, J., Je, S.M., Oh, C.-Y., Cho, M. Kim, J., Kim, J., Choi, W.-S. and Lee, Y.-K. 2021. Emission rates of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) from various tree species in Korea (I). *Journal of Korea Society of Forest Science* 110(4): 543-553.
- Chen, M., Wang, C., Li, L., Wang, Y. and Jiang, S. 2010. Retention of volatile constituents in dried toona sinensis by GC-MS analysis. *International Journal of Food Engineering* 6(2): 1-8.
- Cheong, J.-P. and You, S.-J. 2010. Estimation on the contribution of VOCs and nitric oxides in creating photochemical ozone. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 32(2): 209-218.
- Ding, X., He, Q.-F., Shen, R.-Q., Yu, Q.-Q. and Wang, X.-M. 2014. Spatial distributions of secondary organic aerosols from isoprene, monoterpenes, β -caryophyllene, and aromatics over China during summer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119(20): 11877-11891.
- Geron, C., Harley, P. and Guenther, A. 2001. Isoprene emission capacity for US tree species. *Atmospheric Environment* 35 3341-3352.
- Harrison, D., Hunter, M.C., Lewis, A.C., Seakins, P.W., Nunes, T.V. and Pio, C.A. 2001. Isoprene and monoterpene emission from the coniferous species *Abies Borisii-regis*-implications for regional air chemistry in Greece. *Atmospheric Environment* 35(27): 4687-4698.
- Karlsson, T., Rinnan, R. and Holst, T. 2020. Variability of BVOC emissions from commercially used willow (*Salix* spp.) varieties. *Atmosphere* 11(4): 356-379.
- Kim, H., Lee, M., Kim, S., Guenther, A.B., Park, J. Cho, G. and Kim, H.S. 2015. Measurements of isoprene and monoterpenes at Mt. Taehwa and estimation of their emissions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 17(3): 217-226.
- Lim, Y.-J., Armendariz, A., Son, Y.-S. and Kim, J.-C. 2011. Seasonal variations of isoprene emissions from five oak tree species in East Asia. *Atmospheric Environment* 45(13): 2202-2210.
- Laffineur, Q., Aubinet, M., Schoon, N., Amelynck, C., Müller, J.F., Dewulf, J., Langenhove, H.V., Steppe, K., Simpraga, M. and Heinesch, B. 2011. Isoprene and monoterpene emissions from a mixed temperate forest. *Atmospheric Environment* 45(18): 3157-3168.
- Lee, K.-H., Kim, H.-C. and Hu, C.-G., 2014. A study on the estimation of BVOCs emission in Jeju Island (1). *Journal of Environmental Science International* 23(12): 2057-2069.
- Ortega, J. and Helmig, D. 2008. Approaches for quantifying reactive and low-volatility biogenic organic compound emissions by vegetation enclosure techniques Part A. *Chemosphere* 72(3): 343-364.

- Park, M.-J., Choi, W.-S., Cho, M., Kim J., Kim, J. and Lee, Y.-K. 2021. The variations of monoterpene emission from *Pinus densiflora* in Simwon village at Giri mountain. Journal of Korea Society of Forest Science 110(1): 13-21.
- Statistics Korea. 2021. Statistical Yearbook of Forestry. http://index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2808, 2021-01-22.
- Toma S. and Bertman S. 2012. The atmospheric potential of biogenic volatile organic compounds from needles of white pine (*Pinus strobus*) in Northern Michigan. Atmospheric Chemistry and Physics 12(4): 2245-2252
- Wu, K., Yang, X., Chen, D., Gu, S., Lu, Y., Jiang, Q., Wang, K., Ou, Y., Qian, Y. and Shao, P. 2020. Estimation of biogenic VOC emissions and their corresponding impact on ozone and secondary organic aerosol formation in China. Atmospheric Research 231: 104656.
- Xiaoshan, Z., Yujing, M., Wenzhi, S. and Yahui. Z. 2000. Seasonal variations of isoprene emissions from deciduous trees. Atmospheric Environment 34(18): 3027-3032.
- Yu, S.-J. and 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.

Manuscript Received : October 19, 2022

First Revision : November 29, 2022

Accepted : November 30, 2022