

산림-대기 간 자연적휘발성유기화합물 관측 기법에 따른 교환량 비교

박현주¹ · 김소영^{1†} · 홍유덕¹ · 한진석² · 김세웅³ · 안승만⁴

¹국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과, ²국립환경과학원 기후대기연구부,
³캘리포니아 대학교 지구시스템과학과, ⁴건국대학교 신기술융합학과

Comparison of BVOC Fluxes between Forest and Atmosphere with Different Estimation Methods

Hyun-Ju Park¹, So-Young Kim^{1†}, You-Deog Hong¹, Jin-Seok Han²,
Sae-Wung Kim³, and Seong-Man An⁴

¹Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, 404-708, Korea

²Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, 404-708, Korea

³Department of Earth System Science, University of California, Irvine, 92697, USA

⁴Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University, 143-701, Korea

Received December 27, 2013/Revised January 7, 2014/Accepted February 27, 2014

Monitoring the flux of BVOCs (Biogenic volatile organic compounds) between the atmosphere and forest is necessary to study global climate change and regional air quality. BVOCs play an important role in the formation of photochemical oxidant, and they are routinely emitted by plants into the atmospheric environment. For this reason, the National Environmental Research Institute (NIER) has constructed an air quality monitoring tower in Mt. Taehwa. In this study, we measured BVOC flux from forest using a enclosure chamber system and a REA (Relaxed Eddy Accumulation) system. It was found that monoterpene (90%) was emitted from *Pinus koraiensis*, and isoprene (87%) was emitted from *Quercus variabilis*. Also, major monoterpenes of *Pinus koraiensis* were α -pinene (44%) and 3-carene (17%). Isoprene was detected by the REA system at 20 m height of the tower. As toluene emission is more similar to monoterpene emission, it can be assumed that toluene was emitted from trees when they are stressed. Finally, isoprene was mainly detected by the REA system in Mt. Taehwa.

Key words: BVOC, Flux, Emission rate, REA, Enclosure chamber

1. 서 론

휘발성유기화합물(VOCs: Volatile Organic Compounds)은 대기 중에 존재하는 질소산화물과 반응하여 오존 등의 옥시단트(oxidant)를 생성하는 중요한 역할을 하고 있다.¹⁻³⁾ 일반적으로 VOCs는 자동차, 공장 등 인위적 배출원뿐만 아니라 산림 등 자연생태계에서 배출된다. 산림에서 배출되는 테르펜의 경우, 수목이나 초지류에서 주로 발생되고 있으며 주로 헤미테르펜(hemiterpenes), 모노테르펜(monoterpenes), 세스퀴테르펜

(sesquiterpenes)의 형태로 생물권역에서 화학적으로 생성되거나 배출된다.⁴⁾ 이렇게 산림 등에서 배출되는 자연적 휘발성유기화합물(BVOCs: Biogenic volatile organic compounds)의 양은 인위적으로 배출되는 VOC 양의 약 10배 이상이고 오존 생성 반응성도 인위적 VOCs보다 높은 것으로 알려져 있어 이에 대한 연구가 반드시 필요하다.⁵⁻⁹⁾

특히, 우리나라의 경우에는 전체면적의 약 64%가 산림지역이기 때문에¹⁰⁾ 광화학에 의한 오존 문제를 해결하기 위해서라도 BVOCs에 대한 연구가 함께 이루어져

[†]To whom correspondence should be addressed.

야 한다. 이러한 중요성으로 인해 미국, 일본 등 선진 국가에서는 1980년대부터 BVOCs의 오존생성 원인 규명, 배출량 구축 등 다양한 분야에서 연구가 이루어지고 있으나 국내의 경우 BVOCs에 대한 연구는 일부 학자들에 의해서 수행된 챔버법이 대부분이다.^{11,12)}

이와 같은 이유로 국립환경과학원에서는 경기도 광주시 태화산에 42 m 대기관측타워를 건립하여 2011년부터 BVOCs의 오존생성 원인 규명과 산림-대기간의 BVOC 교환량 관측을 하고 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 두 가지 다른 측정 방법을 통해 BVOC 교환량을 파악하였다. 첫 번째 방법은 산림에서 배출되는 BVOCs의 양을 enclosure chamber를 이용하여 나뭇가지 하나당 배출계수를 계산한 후 바이오매스를 이용해서 교환량을 산정을 하는 것이며 두 번째는 REA(Relaxed Eddy Accumulation)을 이용하여 BVOC 교환량을 산정하는 것이다. 이러한 두 개의 다른 접근 방법은 크게 공간적 규모의 차이로 구분되는데 top-down 방식의 REA 경우, 넓은 규모와 빠른 측정이 가능했다면 bottom-up 방식의 챔버 시스템은 일에서의 직접 교환량을 측정하고 있는 것이라 할 수 있다.

본 연구에서 얻어진 결과를 통해 각 방법에 따른 교환량의 차이를 파악하고 향후 MEGAN (Model of Emissions of Gasses and Aerosols from Nature) 모델결과에 적용하여 국내에 정확한 BVOC 교환량을 예측하는 등의 중요한 자료로 활용될 것이다. 또한 BVOCs로 인해 생성되는 오존의 양을 정확하게 파악함으로써 인위적으로 생성되는 오존의 감축정책에 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1. 측정지점

산림-대기 간 BVOC 교환량 측정을 위해 서울에서

동북쪽으로 약 60 km 떨어진 경기도 광주시 태화산에 대기관측타워를 설치하였다(Fig. 1). 태화산은 해발 644 m로 활엽수림이 전체 산림면적의 60%로 가장 많은 면적을 차지하고 있다. 그러나 설치조건을 고려하여 타워지점을 잣나무 조림지로 선정하여 건축하였으며 이 조림지에 서식하고 있는 잣나무의 평균 임령은 48년, 임목밀도는 433 본/ha으로 조사되었다. 또한 교목층의 잣나무 평균 흉고 직경은 19.1 cm, 최고 42.0 cm, 최저 17.8 cm이며 토양은 유기물이 많은 갈색 산림토로 약산성의 사양토이고 토양밀도는 1.37 g이다.¹³⁾ 태화산 관측 타워는 1.5×1.8 m의 구조물로 타워의 높이는 42 m이고 캐노피높이는 약 18 m이다.

2.2. 측정방법

BVOC 교환량 측정은 REA(Relaxed Eddy Accumulation)과 enclosure chamber를 이용하였다. 연구는 2011년과 2012년에 나뭇잎 성장이 활발한 시기인 5~6월에 수행하였으며 태화산 서울대 학살림에 인공적으로 잣나무가 조림된 구역에서 2층을 선택하였으며 다양한 수종의 BVOC 배출특성을 함께 파악하기 위해 활엽수 중 굴참나무 1종에 대해서도 병행하였다.

2.2.1. Enclosure chamber

본 연구에서 사용된 enclosure chamber법은 과거 반정적(semi-static) enclosure chamber¹⁴⁾나 동적(dynamic flow-through) chamber¹⁵⁾에서 발생된 문제점을 보완하여 개발된 것으로¹⁶⁾ 장치가 경제적이고 효율적이며 챔버 내부에 송풍기, 진공펌프 또는 팬 등이 사용되지 않아 내부적인 오염의 가능성이나 시료의 손실이 최소화 될 수 있다. 또한 빠른 시간 안에 시료가지를 챔버 내에 넣을 수 있어 챔버 내벽과 나뭇잎의 접촉에 의해 발생하는 순간 배출량 증가 가능성을 줄일 수 있는 등에 여러 가지의 장점을 가지고 있다. Fig. 2에서 볼



Fig. 1. Location of tower in Mt. Thaehwa.

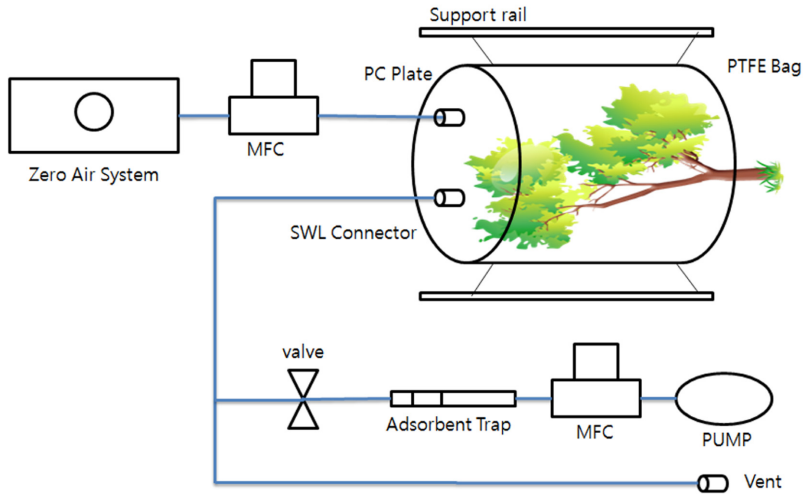


Fig. 2. System for BVOC sampling.

수 있듯이 챔버는 최대 PTFE 재질의 챔버 50 L를 장착할 수 있는 원형 플레이트(직경: 353.6 mm)와 챔버를 지지하는 6개의 지지대로 설계되었으며, 순수공기(zero air) 시스템을 사용하여 공기를 챔버 내에 5 L/min으로 일정하게 공급하고 동시에 유출지점에서 시료를 채취하였다.

시료채취 대상은 잣나무 2개와 굴참나무 1개 수종을 대상으로 하였으며 온도, 광량(PAR: Photosynthetic Active Radiation)의 측정을 위해 챔버 내에 각각 센서를 부착하여 시료채취와 함께 측정하였다. 또한, 챔버 내의 물질의 농도가 평형에 도달하는 시간을 알아보기 위해 일정농도를 주입한 결과 70분 이후부터 안정화를 나타내고 있어 이후에 시료채취를 시작하였다.¹⁷⁾

시료채취는 흡착관(Thermal Desorption Tube, sup-leco, Tenax TA)을 이용하였으며 채취된 흡착관은 현장

에서 4°C 이하로 보관하여 24시간 이내에 실험실로 이동하여 분석을 수행하였다. BVOCs의 화학종을 구분하기 위해 열탈착장치(Automated Thermal Desorber, PerkinElmer, TurboMatrix 650)와 GC/MS(PerkinElmer, Clauus 600)를 이용하였으며 분석 조건은 Table 1과 같다.

또한 각 물질에 대한 정도관리를 위해 검량선 작성한 결과, 물질에 따라 다소 차이는 있으나 대체적으로 0.99 이상의 양호한 값을 나타내었다(Fig. 3).

BVOC 배출속도는 아래 식과 같이 챔버 내의 농도차에 유량을 곱하여 잎 면적으로 나눈 후 산출한다.

$$ERs = [(C_o - C_i)] / A$$

ERs is emission rate ($\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Table 1. GC/MS and ATD system conditions for VOC analysis

GC oven program		ATD	
Initial temp	40°C	Tube	300°C
Initial hold	4 min	valve	200°C
Ramp1	10°C/min to 100°C, hold for 5 min	Temp.	Transfer
Ramp2	7°C/min to 200°C, hold for 10 min		Trap high
Run time	39.29 min		Trap low
	GC/MS		Purge
Ion mode	EI+		Desorb
Start mass	50	Time	Trap temp hold
End mass	300		Trap desorb flow
Source/inlet temp.	250°C		GC column: DB-1 (60 m, 0.32 mm, 1.0 μm)

※ Thermal desorption tube: Tenax TA

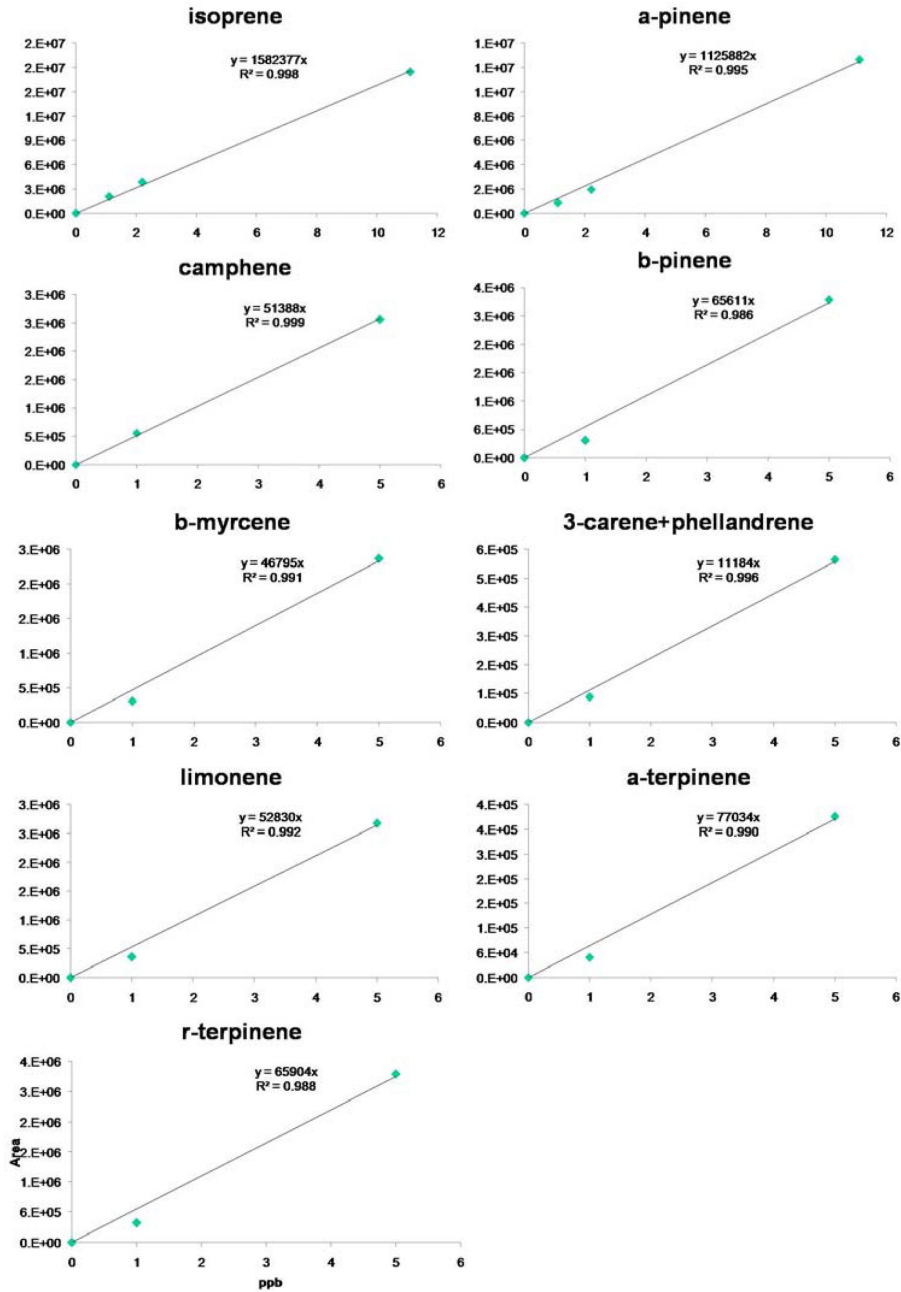


Fig. 3. Standard calibration curve using a GC/MS/ATD system.

C_o is the concentration in the outlet air stream (nmol mol⁻¹)

C_I is concentration in the inlet air stream (nmol mol⁻¹)

f is the flow rate (mol s⁻¹)

A is leaf area or leaf mass (m²)

2.2.2. REA(Relaxed Eddy Accumulation)

REA(Relaxed Eddy Accumulation)은 산림-대기 간 BVOC 교환량을 산정하기 위해 에디공분산 방법을 변형한 방법으로 현재 전 세계 10~20여 곳 이상에서 BVOC 교환량 측정을 위해 수행하고 있다.

따라서 본 연구에서도 REA 방법을 적용하여 측정하

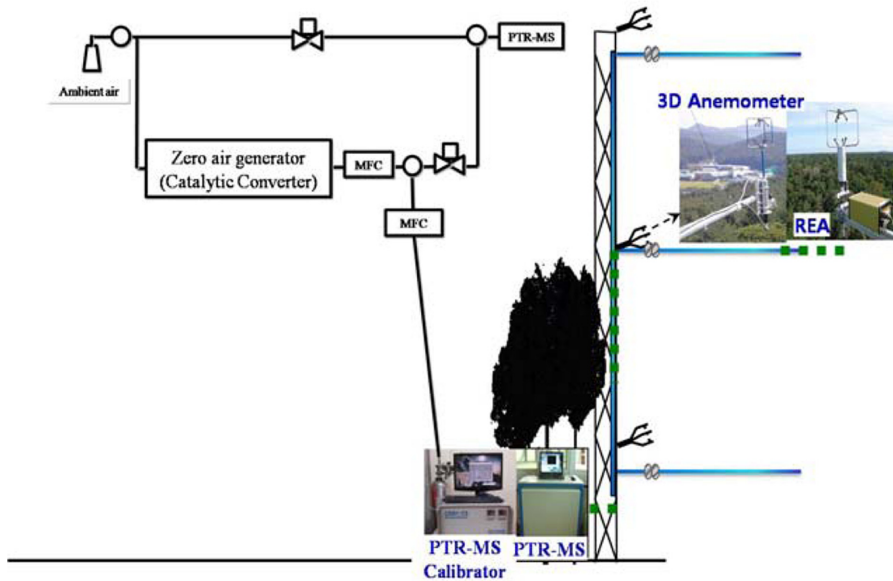


Fig. 4. REA system for the measurement of BVOC flux.

였으며 대기관측타워의 20 m (캐노피 부근) 높이에 미국국립대기연구소(NCAR: National Center for Atmospheric Research)의 장비 중 3차원 초음파 풍향풍속계(Ultrasonic anemometer, RM Yong, 81000)와 BVOC 흡착관 시료채취기를 설치하여 BVOC 교환량을 관측하였다.

REA 시스템은 초음파 풍향풍속계(RM Young, Model 81000)를 이용하여 난류를 측정하면서 upward 혹은 downward 방향의 난류가 측정될 때마다 1세트(up & down)씩 30분 동안 연속적으로 총 3세트(총 1시간 반 소요) 흡착관에 공기시료를 누적으로 채취하게 된다.¹⁸⁾ 이 장비의 특징은 상대적으로 간단한 장치와 적은 전력 사용량 그리고 간단한 사용이 가능하여 쉽게 BVOC 교환량을 측정할 수 있도록 고안되었다는 점이다(Fig. 5). 시료가 채취된 후 흡착관은 GC/MS 장비를 이용해



Fig. 5. Relaxed Eddy Accumulation system.

분석하고 난 후 아래와 같은 수식에 의해 교환량을 계산한다.

$$F_{BVOC} = \sigma_w b (C_{up} - C_{down})$$

$$b = \frac{w'T'}{\sigma_w(T_{up} - T_{down})}$$

F_{BVOC} : The vertical mass flux of BVOC

C_{up} , C_{down} : The average BVOC concentrations in the updrafts and downdrafts, respectively

σ_w : The standard deviation of the vertical wind velocity

b : The flux proportionality coefficient

w' , T' : The fluctuating components of the instantaneous measured vertical wind velocity (w) and air temperature (T)

T_{up} and T_{down} : The average temperatures of the same updrafts and downdrafts as the BVOC samples

여기서, C_{up} 과 C_{down} 은 흡착관에 의해 측정된 각각 화학종의 농도 값, σ_w 은 수직 바람속도의 표준편차, b 는 초음파 풍향풍속계에 의해 측정되는 연직바람(vertical wind speed: w)과 가온도(virtual temperature: T_v) 측정치에 의해 BVOC 교환량이 계산된다.

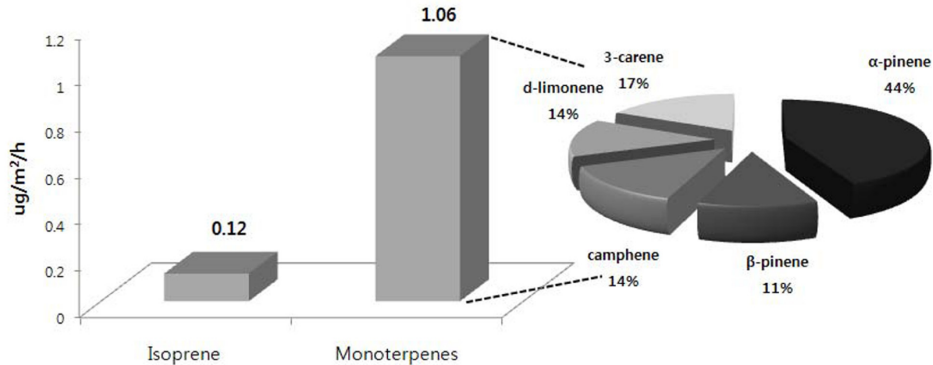


Fig. 6. Characteristics of BVOC emission from *Pinus koraiensis*.

2.3. 바이오메스(Leaf Biomass)

지구에서 1년간 생성되는 총 VOC량은 약 950~1800 TgC/yr로 알려져 있으며,⁹⁾ BVOC 양은 식생의 바이오메스 변동과 관련성이 높기 때문에 정확한 바이오메스 조사가 필요하다. 일반적으로 잎에서 배출되는 BVOCs의 속도가 산출되면 대상 수종이나 산정하고자 하는 지역의 바이오메스를 곱하여 전체 교환량이 계산된다. 바이오메스 측정방법 중 대표적인 방법은 직접 대상 나무의 잎의 면적을 측정하는 방법과 수고자료 등을 구하여 바이오메스 추정식에 적용하여 구한다. 그러나 직접적으로 잎의 면적을 측정하는 방법은 불가능하여 본 연구에서는 BVOC 교환량을 산정하기 위해 항공 LiDAR 자료(국토지리정보원)와 항공사진 정사영상지도(50×50cm 해상도, Daum)를 사용하여 태화산 조림지 잣나무의 임목의 직경 등을 측정하였으며 이는 국가농림기상센터에서 측정하여 그 결과를 제공받아 활용하였다.

항공 LiDAR 시스템(Airborne Light Detection and Ranging System)은 항공기에서 레이저를 지표상에 주사하여 반사되어 돌아오는 레이저 펄스의 도달 시간을 계산 후 반사지점의 공간위치(X, Y, Z)를 취득하는 방법으로 직경 10 cm 내외의 펄스가 일부 또는 전부가 수관을 통과하여 회수됨으로써 잣나무의 임목 직경을 획득할 수 있다.

태화산 잣나무 조림지 항공 LiDAR 자료는 2008년 11월 29일 항공관측을 통해 취득하고 전처리(pre-processing)가 완료된 자료를 국토지리정보원으로부터 받아 처리하였으며 이때 추출관 개별 임목의 수고 자료와 식생조사를 통해 도출한 값을 바이오메스 추정식에 적용하여 잣나무 조림지 내의 총 잎 바이오메스를 산정하였다.

그 결과, 대상지 내 수고 10~16 m 사이에 잣나무가 전체 체적의 65%를 차지하고 있었으며 잣나무 조림지 41.4 ha 면적 내에 분포하고 있는 12,709본의 잣나무조림지의 총 잎 바이오메스 추정량은 220,828 kg으로 나타났다.

3. 연구결과

3.1. Enclosure chamber를 이용한 BVOC 배출특성

Enclosure chamber를 이용하여 2012년 5월 31일부터 6월 5일까지 잣나무에 BVOC 배출속도를 측정하였다. Fig. 6에 잣나무 2개 수종의 BVOC 평균 배출속도를 나타냈으며 그 결과, 주로 모테르펜이 1.06 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{hr}$ 로 배출되고 있었으며 이는 이소프렌(isoprene)보다 약 8배 이상 높은 교환량을 보이는 것으로 조사되었다. 또한 주요 배출되는 모노테르펜은 알파 파인(α -pinene)이 44%로 가장 높게 나타났고 3-카렌(3-carene), 디-리모넨(d-limonene), 캄펜(camphene), 베타 파인(β -pinene) 순으로 배출되는 것으로 조사되었다.

수목에서 BVOCs가 배출되는 이유는 수목과 주변 환경의 복잡한 상호작용에 의한 것으로¹⁹⁻²¹⁾ 생리적 관점에서 볼 때에는 온도와 광량 등에 의해서 식물체 내의 온도가 상승되어 BVOCs가 배출되는 것으로 밝혀졌다. 또한 잎의 구조와 기공의 개폐에 따른 식물체 자체의 동화작용의 영향으로도 BVOCs가 배출되는 것으로 알려져 있다.²²⁾

또한 다른 연구에 의하면 BVOCs의 종류와 특성은 수목의 종류마다 차이는 있으나 침엽수에서는 모노테르펜이 주로 배출되고 있다고 보고되고 있으며 이는 온

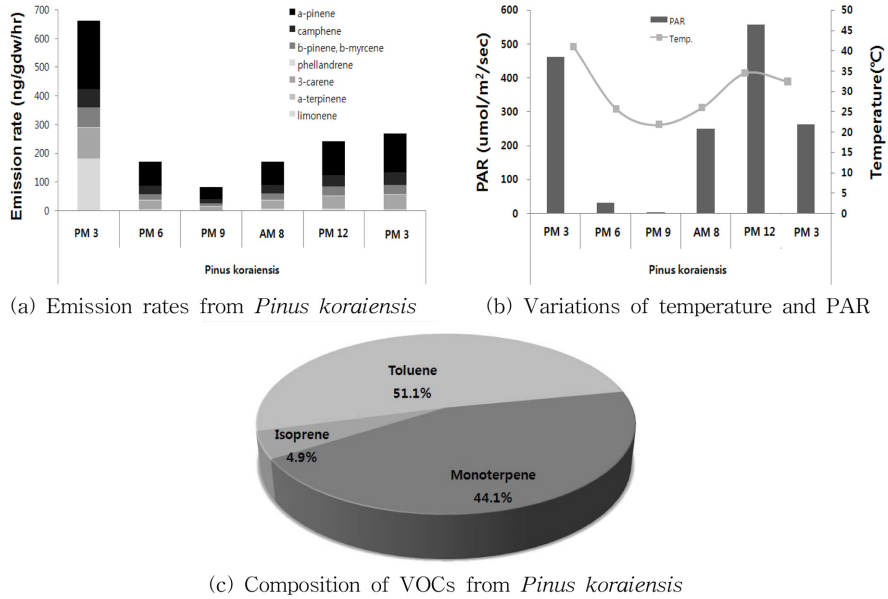


Fig. 7. Characteristic of VOC emission, temperature and PAR from *Pinus koraiensis*.

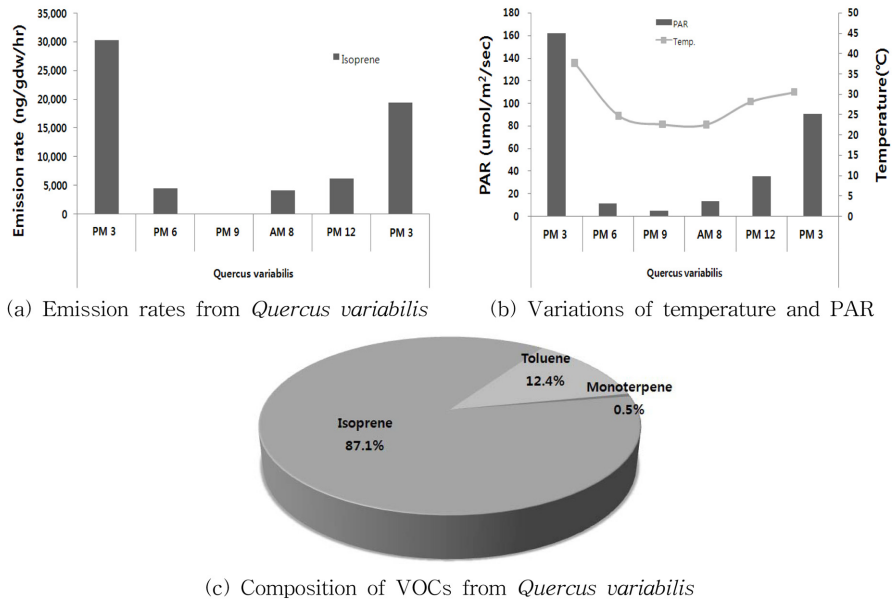


Fig. 8. Characteristic of VOC emission, temperature and PAR from *Quercus variabilis*.

도, 광량과 같은 기상인자의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 이에 대한 비교 분석도 병행하였다.²³⁻²⁶ 그 결과, 오후 12시부터 3시까지 온도와 광량이 각각 40°C, 500 μmol/m²/sec로 높게 나타났으며 이에 따라 모노테르펜의 배출속도도 최대 650

ng/gdw/hr까지 높게 나타났다.

활엽수 중 굴참나무의 경우 잣나무와는 다르게 주로 이소프렌이 87%로 가장 높게 배출되고 있었으며 특히 광량(PAR)이 최대 160 μmol/m²/sec로 증가됨에 따라 배출속도가 30,000 ng/gdw/hr 증가되는 것을 확인할 수

Table 2. Characteristic of toluene emission from Thompson Farm³¹⁾

(Unit: pptv/d)

Year	Toluene from Fuel Evaporation	Toluene from Crop Plant Emissions	Toluene from Pine Tree Emissions	Summer Toluene Enhancement
2004	22±7	5±0.3	12±7	21±6
2005	16±6	5±0.3	12±7	43±9
2006	30±10	5±0.3	12±7	50±10

Table 3. Result of BVOC fluxes using the REA system and the enclosure chamber

Compounds	REA(μg/h)						Enclosure Chamber (μg/h)	
	2011		2012				2012	
	may	31-May	1-June	4-June	5-June	7-June	June	
Isoprene	-	0.68	0.83	0.85	5.02	2.42	0.12	
α-pinene	0.27	0.50	0.52	0.59	0.62	0.6	0.46	
β-pinene	0.10	0.14	0.07	0.17	0.16	0.14	0.12	
Monoterpenes	camphene	0.08	0.13	0.05	0.43	0.12	0.17	0.15
	d-limonene	2.92	0.74	n/d	0.02	N·D	N·D	0.15
	3-carene	-	0.10	0.11	0.11	0.06	N·D	0.19

있었다. 또한 광량이 없는 오후 9시에는 이소프렌의 배출이 거의 되지 않는 것으로 조사되었다(Fig. 8). 이러한 연구 결과는 활엽수의 이소프렌 배출특성이 광량과 상관성이 매우 높음을 나타내주고 있으며²⁷⁻²⁹⁾ 향후 국내에 주요 분포하는 다양한 종류의 활엽수에 대한 BVOC 배출특성이 산정되어야 할 것으로 판단된다.

또한, 인위적 오염원으로 알려져 있는 톨루엔(Toluene)이 잣나무와 굴참나무에서 모두 높은 비율로 검출되었다. 이는 Heiden et al. (1999)의 연구에서 나무가 스트레스를 받으면 톨루엔이 최대 100배까지 배출될 수 있다는 것과 White et al. (2009) 연구에서 농작물 등의 식생에서도 톨루엔이 배출된다는 연구결과와 유사하게 조사되었다.³⁰⁻³²⁾ 따라서 향후 VOC 대책 마련에 BVOC 교환량과 함께 톨루엔 등의 인위적인 VOCs에 대한 부분도 꼭 파악되어야 할 것으로 판단된다.

3.2. REA를 이용한 BVOC 배출특성

REA 시스템의 경우, 대기관측타워의 20m(캐노피 부근) 높이에 3차원 초음파 풍향풍속계와 REA 시스템을 사용하여 측정하였으며, 2011년도의 경우 5월 16~18일 사이에 모노테르펜(monoterpene)에 대해서만 측정하였다.

그 결과, 모노테르펜 중 반응성이 가장 큰 디-리모넨(d-limonene)이 2.92 μg/m²/h으로 높게 나타났으나 2012년에는 각각의 모노테르펜 물질보다 이소프렌(5.02 μg/m²/h)이 더 많은 것으로 조사되었다. 특히 모노테르펜 중

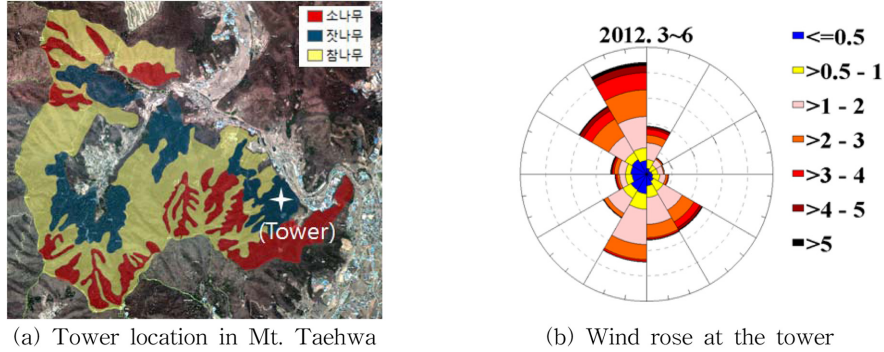
에서는 알파-파인(α-pinene)은 월별로 0.5 μg/m²/h 이상으로 나타나 2011년 결과와는 상의하게 조사되었다. 특히 봄철에는 리모넨 성분이 주로 검출되다가 6월에는 알파 파인의 농도가 급격히 높아지고 있어 향후 월별 또는 계절별의 자료가 추가적으로 확보되어야 할 것으로 판단된다.

3.3. Enclosure chamber와 REA에 의한 BVOC 교환량 비교

태화산 잣나무 조림지역의 BVOC 교환량은 REA 결과값과 챔버법에서 얻어진 잣나무의 BVOC 배출속도에 잣나무 잎 면적을 곱하여 산정하였다. 두 방법의 결과를 비교해본 바에 의하면 챔버법에서는 이소프렌보다 모노테르펜의 교환량이 더 높게 나타났으며 특히 모노테르펜의 교환량은 다른 물질에 비해 0.46 μg/m²/h으로 비교적 높은 교환량을 보이고 있다.

두 방법 간의 차이의 원인을 파악하기 위해 대기관측타워의 위치와 측정기간 동안에 타워 중심으로 바람 분포를 확인하였다(Fig. 9). 그 결과, 타워 중심으로 330~360°의 풍향이 20%로 가장 높은 분포를 보이고 있었으며 이는 REA 결과에 나타나 있듯이 북쪽에서 부는 바람의 영향으로 참나무에서 배출되는 이소프렌이 타워 중심 부근에 영향을 주는 것으로 판단된다. 특히 태화산의 경우 60%이상이 활엽수로 분포되어 있어 그 영향이 큰 것으로 판단된다.

일반적으로 BVOC 교환량을 산정하는 모델에는 온도,



(a) Tower location in Mt. Taehwa

(b) Wind rose at the tower

Fig. 9. Location and wind rose of the tower.

광량, 수령, 토양 등의 많은 변수가 적용되며 잎면적 지수(Leaf Area Index)과 수목에서의 잎의 분포 등의 가정을 두고 접근하기 때문에^{32,33} 실측값과 상이할 가능성이 높다. 특히 다양한 변수들과 BVOC 배출속도를 국외 자료를 이용하여 국내 교환량 산정을 하는 경우가 있어 실제로 국내 BVOC 교환량은 과소평가되거나 과대평가되어 오존과 관련 정책이 잘못 계획될 가능성이 높다. 따라서 본 연구의 결과에서 나온 실측값을 이용하여 모델을 통해 교환량을 산정 후 비교한다면 우리나라 전체에 대한 BVOC 교환량의 정확한 모사결과를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 따라 향후 태화산에 전체 60% 이상을 차지하고 있는 활엽수에 관한 BVOC 교환량에 관한 연구가 진행되어야 할 것이며 더 나아가 우리나라에 주요 수종으로 식재되어 있는 침엽수와 활엽수에 대해서도 이루어져야 할 것이다. 이러한 연구를 통해 BVOC 종류와 교환량을 파악하고 이로 인해 생성되는 오존의 양을 정확하게 파악한다면 오존 감축정책을 보다 정확하게 계획할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

산림-대기 간 BVOC 교환량 연구는 전 지구적 기후 변화와 지역 대기질 연구를 위해 반드시 필요한 연구이다. 따라서 국립환경과학원에서는 경기도 광주시 태화산에 대기관측타워를 건립하여, 태화산 내 BVOCs를 연구하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

2012년 6월에 enclosure chamber를 이용해서 잣나무 2개와 굴참나무 1개에서 측정된 BVOC의 배출특성을 보면 잣나무의 경우, BVOC 배출속도가 모두 온도와 광량이 41°C, 460 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ 까지 증가될 때 최대

350 ng/gdw/hr로 높게 나타났으며 굴참나무의 이소프렌은 최대 30,000 ng/gdw/hr으로 배출되고 있었다. 또한 잣나무와 굴참나무에서 모두 톨루엔의 배출속도가 51%, 12%로 비교적 많은 부분을 차지하고 있어 향후 이에 대한 장기관측이 보다 필요할 것으로 생각된다. REA와 enclosure chamber로 측정된 BVOC 배출특성을 비교해보면 타워 20m에서 측정된 REA의 BVOC 교환량은 이소프렌이 5월에 5.02 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{hr}$ 로 가장 높았으나 enclosure chamber는 이소프렌보다 모노테르펜의 교환량이 0.12 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{hr}$ 로 더 높은 것으로 나타났다. 이는 enclosure chamber인 경우 잣나무를 대상으로 교환량을 산정하였기 때문에 나타난 결과로 보이며 REA의 경우 활엽수가 60% 이상 차지하고 있는 태화산의 BVOC 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

본 연구결과는 향후 우리나라 전체의 BVOC 교환량을 산정하는데 기초적인 자료로 활용될 것이며 BVOCs에 의해 생성되는 오존과 같은 광화학물질 저감하기 위한 정책 자료로도 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김조천, “국내의 휘발성유기화합물현황 및 관리기술”, *한국대기환경학회*, 2006, 22, 743-757.
2. 진준민, 허당, 김동술, “여수산단 대기 중 휘발성유기화합물 농도 경향”, *한국대기환경학회*, 2003, 19, 663-677.
3. B. Schwehr, “Definitions of VOC and ROG”, *California Air Resources Board*, 2004, 1-6.
4. J. Kesselmeier and M. Staudt, “Biogenic volatile organic compounds (VOC) an overview on emission”, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1999, 33, 23-88.
5. C. M. Benkovitz, S. E. Schwartz, M. P. Jensen, M. A. Miller, R. C. Easter, and T. S. Bates, “Modeling atmo-

- spheric sulfur over the northern hemisphere during the aerosol characterization experiment 2 experimental period”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **2004**, 109, 1984-2012.
6. C. Wiedinmyer, A. Guenther, P. Harley, N. Hewitt, C. Geron, P. Artaxo, R. Steinbrecher, and R. Rasmussen, “Global organic emissions from vegetation, in emissions of atmospheric trace compounds”, *Kluwer Academic Publisher*, **2004**, 115-170.
 7. J. D. Fuentes, M. Lerdau, R. Atkinson, D. Baldocchi, J. W. Bottenheim, P. Ciccioli, B. Lamb, C. Geron, L. Gu, A. Guenther, T. D. Sharkey, and W. Stockwell, “Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: a review”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **2000**, 81, 1537-1575.
 8. M. O. Andreae and P. J. Crutzen, “Atmospheric aerosols: biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry”, *Science*, **1997**, 276, 1052-1058.
 9. A. Guenther, C. N. Hewitt, D. E. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, M. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor, and P. R. Zimmerman, “A global model of natural volatile organic-compound emissions”, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **1995**, 100, 8873-8892.
 10. 산림청, “임업통계연보”, **2011**, 제41호, 39-40.
 11. D. Y. Ji, S. Y. Kim, and J. S. Han, “A study on the comparison to source profile of the major terpenes from pine tree and korea pine tree”, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, **2002**, 18, 515-525.
 12. J. C. Kim, J. H. Hong, C. H. Gang, Y. Sunwoo, K. J. Kim, and J. H. Lim, “Comparison of monoterpene emission rate from conifer”, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, **2004**, 20, 175-183.
 13. 국가농림기상센터, “산림지역 이산화탄소 교환량 측정 및 자료확정 방법 구축”, **2011**, 19-20.
 14. P. R. Zimmerman, “Natural sources of ozone in houston: natural organics ; in proceeding of speciality conference on ozone/oxidants-interactions with the total environment”, *In proceeding of: APCA specialty conference*, **1979**, 70, 299-310.
 15. A. Winer, J. Arey, R. Atkinson, S. Aschmann, W. Long, L. Morrison, and D. Olszyk, “Emission rates of organics from vegetation in california's central valley”, *Atmospheric Environment*, **1992**, 26a, 2647-2659.
 16. J. C. Kim, “Development of a novel sampling technique for natural VOC emissions”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2001**, 17, 61-70.
 17. H. J. Park, S. Y. Kim, Y. D. Hong, J. S. Han, and K. J. Kim, “QA/QC of measurement method for observation VOC flux in the tree,” *Journal of the Korea Society for Environmental Analysis*, **2013**, 16, 163-169.
 18. M. Graus, A. Hansel, A. Wisthaler, C. Lindinger, R. Forkel, K. Hauff, M. Klauer, A. Pfichner, and B. Rappengluck, “A relaxed-eddy-accumulation method for the measurement of isoprenoid canopy-fluxes using an online gas-chromatographic technique and PTR-MS simultaneously”, *Atmospheric Environment*, **2006**, 40, 43-54.
 19. S. Y. Kim, “A study on the source characteristic of BVOCs from vegetation in Korea and implication on the ambient air-emphasizing on aldehyde compounds”, *Doctor's thesis in Konkuk university*, **2005**, 19-20.
 20. H. K. Lappalainen, S. Sevanto, J. Back, T. M. Ruuskanen, P. Kolari, R. Taipale, J. Rinne, M. Kulmala, and P. Hari, “Day-time concentration of biogenic volatile organic compounds in a boreal forest canopy and their relation to environmental and biological factors”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2009**, 9, 5447-5459.
 21. T. D. Sharkey, “Isoprene synthesis by plants and animals”, *Endeavor*, **1996**, 20, 74-78.
 22. U. Niinemets, “Costs of production and physiology of emission of volatile leaf isoprenoids”, *Advances in Plant Physiology*, **2004**, 7, 241-278.
 23. M. Lerdau, M. Litvak, P. Palmer, and R. Monson, “Controls over monoterpene emissions from boreal forest conifers”, *Tree Physiology*, **1997**, 17, 563-569.
 24. H. Hakola, T. Laurila, J. Rinne, and K. Puhto, “The ambient concentrations of biogenic hydrocarbons at a northern european boreal site”, *Atmospheric Environment*, **2000**, 34, 4971-4982.
 25. H. Hakola, V. Tarvainen, T. Laurila, V. Hiltunen, H. Hellen, and P. Keronen, “Seasonal variation of VOC concentrations above a boreal coniferous forest”, *Atmospheric Environment*, **2003**, 37, 1623-1634.
 26. V. Tarvainen, H. Hakola, H. Hellen, J. Back, P. Hari, and M. Kulmala, “Temperature and light dependence of the VOC emissions of scots pine”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2005**, 5, 989-998.
 27. O. Hirotsuke, I. Masashi, T. Tomonori, N. Maki, S. Seikoh, and F. Masakazu, “Temperature threshold of isoprene emission from tropical trees”, *Chemosphere*, **2014**, 95, 268-273.
 28. F. Pacifico, S. P. Harrison, C. D. Jones, and S. Sitch, “Isoprene emissions and climate”, *Atmospheric Environment*, **2009**, 43, 6121-6135.
 29. J. J. Lim, J. C. Kim, K. J. Kim, Y. S. Son, Y. Sunwoo, and J. S. Han, “Seasonal variation of monoterpene emissions from Pinus densiflora in East Asia”, *Chemosphere*, **2008**, 73, 470-478.
 30. A. C. Heiden, K. Kobel, M. Komenda, R. Koppmann, M. Shao, and J. Wildt, “Toluene emission from plants”, *Geophysical Research Letters*, **1999**, 26, 1283-1286.
 31. S. Kim, T. Karl, A. Guenther, G. Tyndall, J. Orlando, P.

- Harley, R. Rasmussen, and E. Apel, "Emission and ambient distributions of biogenic volatile organic compounds (BVOC) in a ponderosa pine ecosystem: interpretation of PTR-MS mass spectra", *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2010**, 10, 1759-1771.
32. M. L. White, R. S. Russo, Y. Zhou, J. L. Ambrose, K. Haase, E. K. Frinak, R. K. Varner, O. W. Wingenter, H. Mao, R. Talbot, and S. C. Sive, "Emission rates of organics from vegetation in California's central valley", *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2009**, 9, 81-92.
33. A. Guenther, T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer, and C. Geron, "Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN", *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2006**, 6, 3181-3210.