

유효광합성량 (PAR)의 증가에 따른 BVOCs 배출 특성 변화

Variations of BVOCs Emission Characteristics according to Increasing PAR

손윤석¹⁾ · 황윤서²⁾ · 성주한³⁾ · 김조천^{1),2),*}

¹⁾건국대학교 신기술융합학과, ²⁾건국대학교 환경공학과

³⁾국립산림과학원 산림생태연구과

(2011년 10월 25일 접수, 2011년 11월 25일 수정, 2012년 1월 13일 채택)

Youn-Suk Son¹⁾, Yoon Seo Hwang²⁾, Joo Han Sung³⁾ and Jo-Chun Kim^{1),2),*}

¹⁾Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University

²⁾Department of Environmental Engineering, Konkuk University

³⁾Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute

(Received 25 October 2011, revised 25 November 2011, accepted 13 January 2012)

Abstract

In this study, emission rates (ER) of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) were measured by varying levels of photosynthetically active radiation (PAR). An appropriate plan for ozone reduction according to increasing ecology area ratio in future metropolitan areas was suggested. Several trees were selected as representative tree species in urban areas. Emission rates and composition ratios of monoterpene and isoprene emitted from these trees were estimated and compared. As a result, it was found that emission rates of BVOCs were considerably different depending on tree species. Especially, BVOCs emitted from *Platanus orientalis* and *Quercus mongolica* could significantly affect ozone increase in the metropolitan area, because the emission rates were several thousands to ten thousand times higher than those emitted from *Zelkova serrata* and *Prunus serrulata*. Furthermore, it was observed that emission rates of BVOCs by species increased maximum up to 10 times when PAR, which has close relations with temperature, rose. It was concluded that tree species such as *Zelkova serrata et al.*, was appropriate for metropolitan areas since the species has low ozone potential and good landscape. Suppose this type of trees are planted on purpose in the urban areas, better ambient air quality will be promised in the future.

Key words : Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs), Ozone, PAR, Monoterpene, Isoprene

1. 서 론

대류권의 오존은 대기 중에서 태양광선에 의해 휘

발성 유기화합물 (VOCs)과 질소산화물 (NO_x)의 광화학적 산화반응을 통해 생성되는데 미국 환경청 (USEPA)은 이러한 VOCs를 오존 농도를 증가시켜 스모그 현상을 야기시키는 물질이라 정의하고 있다 (환경부, 2007). 대기 중의 오존은 전구물질인 VOCs와 NO_x가 배출된 바로 그 지점에서 형성되지 않음

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-450-4009, E-mail : jckim@konkuk.ac.kr

며, 일반적으로 전구물질이 기상조건에 의해 이동되어 다른 지역에 오존을 형성하는 이동성의 특징을 가지고 있다. 따라서 오존 생성 저감을 위해서는 광역성의 오존특성을 고려한 상기의 전구물질 제어 연구가 필요하다.

이러한 오존은 지난 150년 동안 거의 30%가 증가하였다. 또한 오존 농도가 60 ppb 이상인 숲이 전 세계 숲의 29%에 달하고 있으며, 2100년까지는 그러한 숲이 50% 이상으로 될 것으로 예측하고 있다 (Paoletti *et al.*, 2007). 우리나라의 경우에도 대기 중 오존농도는 증가추세를 보이고 있으며 (이중현 등, 2006) 95년부터 도입된 오존 주의보 (0.12 ppm 이상) 발령 횟수가 2002년에는 9일 (45회), 2006년에는 34일간 (52회) 2007년에는 46일간 (82회)로 그 횟수가 점점 증가하고 있다. 따라서 환경부에서는 대기 중 오존 농도를 줄이기 위하여 인위적인 VOCs의 규제 등 많은 노력을 기울이고 있다.

VOCs는 인위적 또는 자연적인 경로를 통하여 대기로 배출된다 (Guenther *et al.*, 1995). Isoprene과 monoterpene을 포함하는 비메탄류는 자연적인 배출을 통하여 연간 약 1150×10^7 톤이 배출되는데 이는 대기로 배출되어지는 메탄류 배출량 (인위적: 약 $350 \sim 375 \times 10^7$ 톤, 자연적: 약 $155 \sim 240 \times 10^7$ 톤)의 2배에 달하는 수치이다 (Atkinson, 2000). 자연적으로 배출되는 BVOCs (Biogenic volatile organic compounds)는 주로 수목에서 배출되며 비메탄계 휘발성화합물의 90% 이상이 수목에서 배출되고 있다 (Xiaoshan *et al.*, 2000). 또한, 대부분의 BVOCs의 경우 체류기간이 짧고 반응성이 높아 인위적 NO_x 의 발생이 높은 지역에서 오존발생을 촉진시킬 수 있다 (Lamb *et al.*, 1987).

이와 같이, BVOCs는 질소산화물이 많은 도시 지역에서는 광화학반응으로 인하여 오존을 생성하고, 대기의 주요 산화제 (OH, O_3 , NO_3)와의 높은 반응성으로 인하여 순 산화제 형성 (net oxidant formation) 및 이차 유기 에어로졸 (secondary organic aerosol, SOA)을 형성하여 대기질과 기후변화에 큰 악영향을 주고 있고 메탄과 이산화탄소 같은 주요한 대기 가스의 체류시간을 늘려주는 역할을 함으로 인하여 전 지구적 탄소 총량에 막대한 영향을 미친다 (Harrison *et al.*, 2001; Xiaoshan *et al.*, 2000). 우리나라의 경우 전 국토의 64%를 산림이 차지하고 있으며, 이 중 도

시림이 17%를 차지하는 것으로 알려져 있다. 또한, 현재는 도심이나 택지 등의 개발에 있어서 생태면적율을 상당 부분 확보해야 됨으로써 산림이 차지하는 면적은 점점 확대될 전망이다. 특히 서울시의 경우에는 서울시 도시계획 조례를 제정하여 건축물의 종류에 따라 건축시 생태면적율 (옥상녹화 제외)을 지역에 따라 20~50% 이상 확보하도록 정하고 있고 이와 같은 시민들의 환경적인 인식이 높아질수록 도시내의 생태면적율에 대한 요구는 더욱 증가할 예정이다 (서울시, 2011). 이에 따라 수도권 지역뿐만 아니라 다른 대도시에서의 BVOCs의 배출량의 비율이 커질 것으로 예상되지만, 현재까지 국내에서는 인위적인 VOC 배출원에 대한 실태만 파악되었을 뿐이고 BVOCs 배출량에 대한 자료가 외국에 비해서 상당히 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라에서 많이 서식하고 있는 국내 고유 수종을 선택하여 각 수종 별 BVOCs 배출 특성을 비교하고, 유효광합성량 (Photosynthetically Active Radiation; PAR)의 변화에 따른 수목의 BVOCs 배출량 변화를 고찰하고자 한다. 또한, 이러한 연구결과를 바탕으로 향후 수도권의 녹지 형성 시 대기환경의 질을 높일 수 있는 적절한 수종 선택의 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 국내 산림 현황 및 대상 수종의 선택

현재 우리나라의 경우, 전국토의 약 64%를 산림이 차지하고 있으며 그 중 침엽수림은 42%, 활엽수림은 26%를 차지하고 있다. 침엽수림은 소나무, 잣나무, 낙엽송 순으로 많이 식재되어 있으며 활엽수림은 밤나무가 가장 많이 식재되어 있다. 이 중 도시림이란 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」에 의하여 가로수 등 도로변 녹지, 학교 숲, 자연휴양림, 옥상녹화 등을 일컬으며 현재 우리나라는 전체 산림 중 17%를 차지하는 1,102천 ha의 도시림이 도시지역에 분포하고 있다. 그 중 가로수 및 도로변 녹지 (38%, 산림자원법), 근린공원 (61%, 도시공원법)이 도시림 중 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 이 중에서도 생활권도시림은 도시림면적의 3%에 불과하나 도시별로 살펴보면 부산광역시 (27%), 서울특별시 (23%), 인

Table 1. Forest and city forest area by regions.

City	Land area (ha)	Total forest area (ha)	Total urban forest area (ha)	Urban forest area rate (%)
Total	10,020,807	6,370,304	1,102,117.95	44.15
Seoul	60,529	15,733	13,713.88	22.66
Busan	76,607	35,758	15,922.28	24.95
Incheon	102,701	40,583	12,630.67	26.93
Gyeonggi	1,018,676	525,840	150,865.92	39.41

source: Korean Forest Service, 2009

천광역시(22%) 순으로 나타나 대부분의 도시가 도시외곽의 산림보다는 가로수, 도시 숲 등 인간의 노력에 의해 녹화되고 있다는 것을 알 수 있다(표 1).

우리나라의 도시민 1인당 생활권 도시림 면적은 2007년 7.70 m²/인, 2009년 7.76 m²/인으로 매년 증가되고 있는 실정이다. 하지만 이는 세계보건기구 WHO 권장 최소기준 9 m²/인의 86% 수준이며 우리나라는 2017년까지 1인당 생활권도시림은 10 m²/인을 목표로 도시림을 확대하고 있다. 이러한 도시림은 기후 조건과 같은 다양한 환경 조건에 따라서 수종이 매우 다양하게 분포되나 우리나라의 경우 주로 은행나무, 벚나무, 버즘나무, 느티나무 등이 주요 수종을 이루고 있다. 또한, 산림청에서는 20개(주수종 8개, 부수종 12개)의 조림권장 수종을 선정하였는데 주수종은 소나무, 낙엽송, 잣나무, 편백, 해송, 자작나무, 백합나무, 참나무류 등 8개 수종이고, 부수종은 삼나무, 가시나무류, 후박나무, 테다소나무, 리기테다소나무, 물푸레나무, 박달나무, 가래나무, 스트로브잣나무, 느티나무, 거제수나무, 전나무 등 12수종이다. 따라서 위의 수종 중 본 연구에서는 은행나무(*Ginkgo biloba*), 벚나무(*Prunus serrulata*), 버즘나무(*Platanus orientalis*), 느티나무(*Zelkova serrate*), 신갈나무(*Quercus mongolica*), 소나무(*Pinus densiflora*), 전나무(*Abies holophylla*), 잣나무(*Pinus koraiensis*)를 대상으로 연구를 수행하였다. 그리고 수령에 따라 수목에서 발생하는 BVOCs 배출량이 차이가 있다고 알려져(Kim *et al.*, 2005) 있어 모든 실험은 서울시 홍릉에 소재하는 국립산림과학원에서 재배한 3~5년생의 묘목(seedling)을 대상으로 수행하였다.

2. 2 실험장치

수목에서 방출되는 BVOCs 시료를 채취하기 위하여 기존 방법의 문제점을 보완하여 경제적이고 효율

적이며 내부적 오염가능성과 시료의 손실을 최소화시킬 수 있는 그림 1과 같은 BVOCs 배출량 측정기법을 본 연구에 이용하였다(Lim *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2004). 이 장치는 기존의 semi-static enclosures나 dynamic flow-through chamber 등이 가지고 있는 문제점을 보완하기 위하여 만들어졌다(Lim *et al.*, 2011, 2008; Kim *et al.*, 2007; Son *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2005, 2004a, b; Kim, 2001). Chamber system은 테들러백(Tedlar bag 80L, SKC, USA)을 이용하여 자체 제작하여 사용하였다. 또한 챔버 내부에 일정한 PAR(식물이 광합성에 이용하는 400~700 nm 사이의 파장대의 유효광합성량; Guenther, 1997)를 유지하기 위해서 메탈할라이드를 광원으로 하는 전구를 2개 사용하였으며 표준상태(1000 μmol/m²-sec, 30°C)을 기준으로 1000 μmol/m²-sec과 그보다 낮은 500 μmol/m²-sec, 표준상태보다 높은 1200 μmol/m²-sec에서 실험을 진행하였다. 그리고 챔버내의 수분을 항상 일정하게 공급하기 위하여 임핀저를 사용하여 일정한 수분 농도를 유지하였다.

2. 3 시료 채취

수목에서 방출되는 자연 VOC를 효율적으로 시료 채취하기 위해 자체적으로 제작한 고체 흡착관을 사용하였다(Lim *et al.*, 2011, 2008). 고체 흡착관은 Tenax TA (60/80 mesh, SUPELO, USA)와 Carbotrap (20/40 mesh, SUPELO, USA)를 채운 pyrex tube 재질을 이용하여 제작하였다. 시료채취는 안정적인 평형 상태에 도달하기 위하여 PAR를 1200 μmol/m²-sec, 1000 μmol/m²-sec, 500 μmol/m²-sec로 감소시키며 제작된 고체 흡착관을 사용하여 약 100 mL/min의 유량으로 30분 동안 2회 연속하여 시료를 채취하였다(그림 1). 또한, 챔버내의 BVOCs의 평형 농도를 고려하여 모든 실험은 챔버 설치 후 1시간 후부터 시

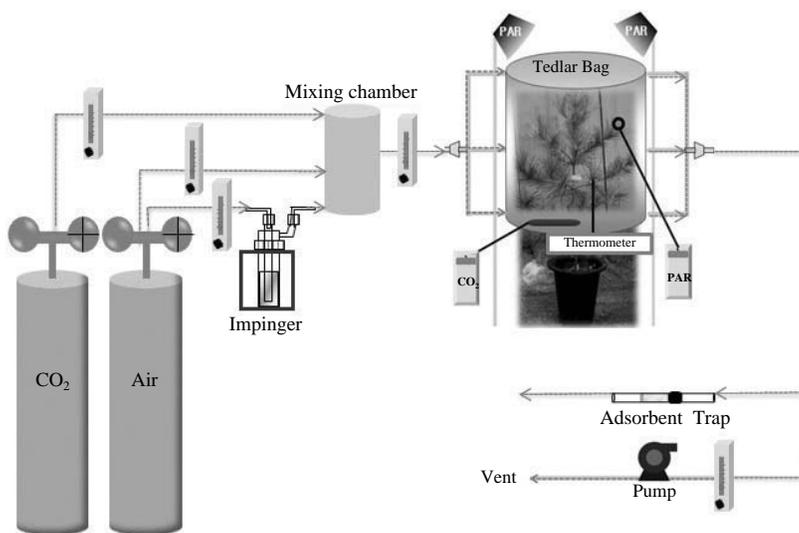


Fig. 1. Sampling chamber system for the determination of BVOCs emission rate.

료채취를 수행하였다.

2. 4 분석방법

채취된 BVOCs 시료는 냉동고에 보관 후 48시간 이내에 분석하였고, 정량분석을 위해서 자동열탈착장치(Tekmar-Dohrmann, Tekmar 6000, USA)와 GC/FID(Hewlett Packard, HP5890, USA)시스템을 사용하였다. 고체흡착관의 열탈착 과정은 320°C에서 일정유량으로 5분간 이루어졌으며, -150°C의 cryo trap을 사용하여 초저온 농축하였다. 220°C의 transfer line을 통하여 시료가 cryo focus로 이동된 후 GC컬럼으로 최종 주입되었으며, 컬럼은 DB-624 capillary (60 m × 0.52 mm, 3.0 μm)를 사용하였다. 정성분석을 위해서 정량분석 때와 동일한 자동열탈착장치가 연결된 GC/MSD(Agilent 6890)시스템을 사용하였다. 컬럼으로는 Capillary DB-1 (60.0 m × 320 μm × 1.0 μm)을 사용하였다. GC/FID를 이용하여 α-pinene, β-pinene, α-terpinene, d-Limonene 등의 11가지 물질에 대하여 검정곡선을 작성한 결과 모든 물질의 결정 계수(r^2) 값이 0.998 이상으로 나타났다. MDL(Method Detection Limit)은 모든 물질에 대하여 2.51 ng(n=7) 이하로 나타났다. 모든 실험 전에는 수목에서 배출되는 BVOCs 측정을 위하여 흡착관의 오염을 방지하고 챔버 내의 공기질의 배경농도 확보를 위하여 blank 실험을 진행

하였다. 이 결과, 5 μg/m³ 이하의 매우 낮은 배경농도를 확보하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 환경대기중의 PAR와 온도의 관계

식생에서 배출되는 BVOCs 배출량은 환경 대기 중에서 PAR와 온도에 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Dominguez-Taylor, 2007; Kuhn et al., 2002; Harrison et al., 2001; Xiaoshan et al., 2000). 상기 두 변수 사이의 상관성을 확인한 결과, 그림 2와 같이 결정계수(r^2)가 0.62로써 자연 상태의 조건을 대상으로 한 연구로서는 매우 높은 상관성을 얻을 수 있었다. 한편 이러한 환경 대기중 PAR 자료는 국내에서는 2003년부터 처음으로 측정된 것이다. 상기의 선행 연구에 의하면 모노테르펜을 주로 배출하는 침엽수의 경우에는 온도에 따라서 배출량이 증감하는 것으로 알려져 있다(Lim et al., 2008; Kim et al., 2005; Kim et al., 2004b). 이는 다음과 같은 함수로 표현할 수 있다.

$$\ln(ER)=a+b(T) \tag{식(1)}$$

여기서 ln(ER)은 모노테르펜 배출속도의 자연로

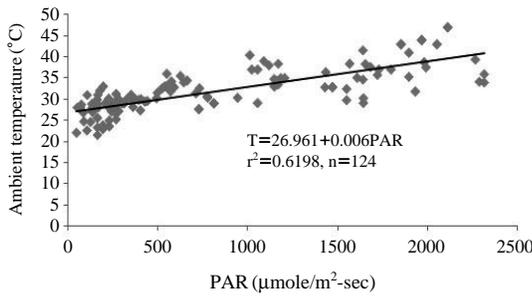


Fig. 2. Correlation between PAR and ambient temperature.

그 값이며 ($\mu\text{gC/gdw-hr}$), T는 온도 ($^{\circ}\text{C}$)이다. 그리고 a와 b는 상수이며, 이들은 배출되는 모노테르펜의 물질 특성과 선택된 나무의 종류에 따라 결정된다 (Kim, 2001; Tingey *et al.*, 1980). 따라서 본 연구에서는 기후변화에 따른 여러 변수들을 최소화시키기 위하여 모노테르펜과 이소프렌의 배출에 직접적인 영향을 미치는 순수한 PAR의 변화에 따른 BVOCs 변화를 연구하였다. 본 연구에서는 PAR가 변하더라도 챔버내 온도의 변화 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)를 최소화하고자 하였다.

3. 2 PAR의 변화에 따른 BVOCs 배출속도

지금까지는 국내외적으로 온도 변화에 따른 식생의 BVOCs 배출속도 연구가 주로 많이 수행되었다. 즉, 현재까지의 연구에 따르면 일정한 대기 환경조건에서 온도가 증가함에 따라 BVOCs가 기하급수적으로 증가한다는 것이 잘 알려져 있다 (Tingey, 1980). 그러나 온도에 직접적 영향을 주고 식물 광합성에 영향을 끼치는 PAR 변화에 따른 연구는 상대적으로 적은 현실이다. 따라서 본 연구에서는 PAR 변화에 따른 BVOCs 배출속도를 알아보기 위하여 PAR를 감소시켜 가며 실험을 진행하였으며 1시간의 안정화 후 시료를 채취하였다. 이 때 또 다른 환경인자인 온도를 일정하게 유지하여 연구를 수행하는 동안 챔버내의 온도를 $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다.

그림 3은 침엽수의 대표적인 수종인 소나무에서의 PAR의 변화에 따른 모노테르펜의 배출 속도의 변화를 나타내고 있다. PAR가 $1200 \mu\text{mol/m}^2\text{-sec}$ 일 때 5959 ng/gdw-hr 으로 가장 높은 배출속도를 보였으며 $500 \mu\text{mol/m}^2\text{-sec}$ 과 $1000 \mu\text{mol/m}^2\text{-sec}$ 일 때는 각각 2168, 1734 ng/gdw-hr 로 유사한 수준의 모노테르펜을

배출하였다. 이와 유사한 결과는 전나무에서도 확인할 수 있었는데, 전나무의 경우에 PAR가 $1200 \mu\text{mol/m}^2\text{-sec}$ 일 때 $500 \mu\text{mol/m}^2\text{-sec}$ 과 $1000 \mu\text{mol/m}^2\text{-sec}$ 에 서보다 약 10배 정도 높은 BVOCs 배출량을 확인할 수 있었다. 선행연구에 따르면 침엽수에서의 모노테르펜 배출량은 PAR보다는 온도구배에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Harrison *et al.*, 2001). 또한 Yokochi and Ambe (1984)의 연구결과에 의하면 소나무의 α -pinene은 빛에 의존하지 않고 온도에 의해 기하급수적으로 증가한다고 보고하고 있다 (Padhy and Varshney, 2005). 하지만 최근 연구결과에 따르면 수종에 따른 모노테르펜의 빛 의존성이 보고되고 있으며 Dominguez-Taylor (2007), Owen *et al.* (2002)의 연구결과에 의하면 전나무 (*Abies religiosa*)의 α -pinene의 경우 isoprene과 유사하게 빛과 온도에 의해 영향을 받는다고 밝혀졌다. 또한 Kuhn *et al.* (2002)의 연구에 의하면 resin ducts에 저장되는 기존 모노테르펜 기작과 이소프렌처럼 저장되지 않고 바로 합성된 후 바로 배출되는 기작의 결과로 빛과 온도에 의한 의존성이 발생하고 있다고 보고된 바 있다. 본 연구의 결과에서도 PAR의 증가에 따라 전나무의 모노테르펜 배출량이 눈에 띄게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 수행하는 동안 PAR 변화에 따라서 1°C 내외의 챔버내 일의 미세한 온도 증감이 관측되었기 때문에 PAR 증가에 의한 온도 변화에 기인한 모노테르펜의 변화를 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 선행 연구결과처럼 수종별로 PAR에 의존성이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있으며 소나무보다 전나무가 PAR에 대한 의존성이 더 높음을 확인할 수 있었다.

활엽수에서는 주로 이소프렌이 방출된다는 선행 연구들에 의하면 이소프렌은 온도와 PAR 변화에 따라서 배출량이 영향을 받는 것으로 알려져 있고, 본 연구에서도 이와 비슷한 결과를 확인할 수 있었다 (Harrison *et al.*, 2001; Xiaoshan *et al.*, 2000). 그림 4에서 보는 것처럼 신갈나무의 경우 PAR가 $1200 \mu\text{mol/m}^2\text{-sec}$ 일 때 1963 ng/gdw-hr 의 이소프렌이 배출되었으며 이는 가장 낮은 PAR인 $500 \mu\text{mol/m}^2\text{-sec}$ 의 경우에 비해 6배 증가한 수치이다. 그러나 동일한 활엽수종 중 느티나무와 벚나무의 경우에는 방출되는 이소프렌의 배출량이 거의 없는 것으로 나타났고 이는 Sun and Leu (2004)와 Benjamin and Winer (1998)의

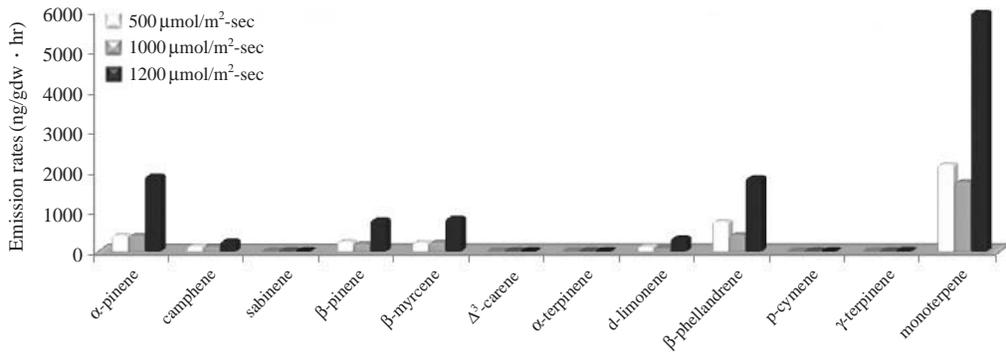


Fig. 3. Emissions of monoterpene from *Pinus densiflora*.

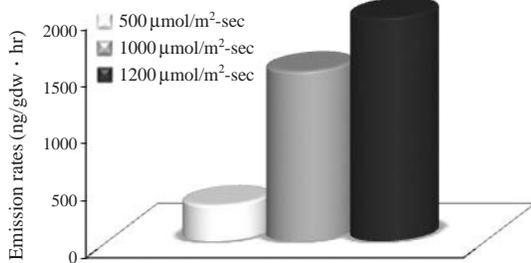


Fig. 4. Emissions of isoprene from *Quercus mongolica*.

선행연구와 일치하는 결과이다.

3. 3 수종별 모노테르펜의 구성비

본 연구에서 활엽수는 대부분 이소프렌만을 배출하고 모노테르펜은 거의 배출하지 않았다. 그림 5는 대표적인 침엽수인 소나무와 전나무에서 배출되는 모노테르펜의 구성비를 보여주고 있다. 두 수종의 경우에 모두 α -pinene, β -pinene 등이 배출되었다. 소나무의 경우 α -pinene (31.6%), β -phellandrene (30.8%), myrcene (14%) 순으로 BVOCs 배출이 이루어졌으며, 전나무의 경우 Δ^3 -carene (43.6%), α -pinene (22.1%), camphene (16%) 순으로 구성비 결과가 나타났다. 선행 연구결과와 비교해 보면 우리나라의 경우 성목 소나무는 α -pinene, myrcene, β -phellandrene, d-limonene 순으로 배출이 이루어졌으며 (Lim *et al.*, 2008), Kondo *et al.* (2009)는 α -pinene, myrcene, α -phellandrene, d-limonene 순으로 배출이 이루어진다고 보고하여 본 연구와 매우 유사한 결과를 보여 주었다. 이외는 달

리, 유럽전나무 (*Abies alba*)의 경우에는 d-limonene, camphene, α -pinene 순으로 배출이 이루어졌으며 멕시코 전나무 (*Abies religiosa*)는 α -pinene, β -pinene, Δ^3 -carene, d-limonene의 BVOCs 배출 순위를 보였다 (Dominguez-Taylor *et al.*, 2007).

이와 같이 모노테르펜은 동일한 수종의 경우에서도 큰 배출량의 차이를 보이며 유전적 차이를 포함하여 잎의 성장, 잎의 나이, 생물기후학 (phenology), 기후조건을 포함한 여러 성장조건에 의해서도 큰 차이를 보인다고 알려져 있다 (Padhy and Varshney, 2005). 본 연구 대상인 전나무 (*Abies holophylla*)의 경우 외국의 전나무와 유전적인 차이를 가지고 있으며, 기존 연구되어진 그리스, 멕시코, 한국의 기후적 차이 등 환경적 조건의 차이로 인하여 모노테르펜 배출 구성비에 있어 크고 작은 차이를 보이는 것으로 판단된다. 이와 같은 이유로 인하여 국내 수종에 대한 추가적이고 보다 상세한 연구가 필요하다. 또한, 배출되는 모노테르펜의 성분에 대하여 광화학반응의 관점에서 볼 때, 국내 침엽수 중 대부분을 차지하는 소나무에서 주로 배출되는 β -phellandrene과 myrcene의 OH라디칼과의 반응속도상수가 α -pinene과 같은 다른 테르펜류보다 훨씬 높다 (약 5배 이상)고 알려져 있다 (Lim *et al.*, 2008; Atkinson, 2000). 따라서 국내 광화학 스모그 발생에 전나무보다는 소나무가 더 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

3. 4 수도권 주요 도시립의 BVOCs 배출속도 비교

그림 6은 국내 주요 도시립의 침엽수에서 여름철

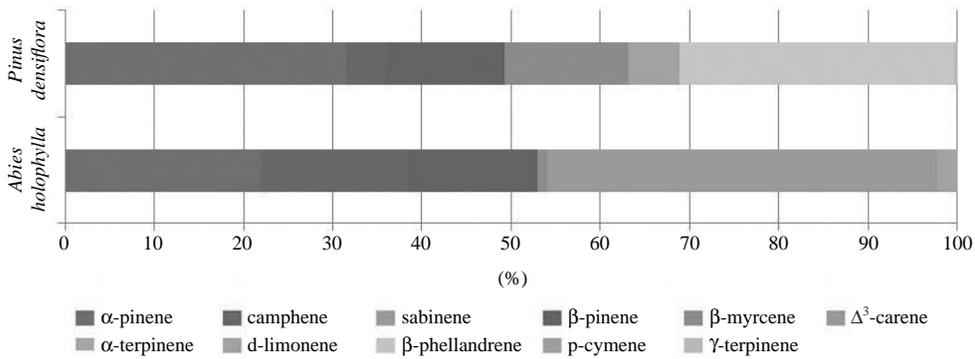


Fig. 5. Monoterpene composition ratios emitted from *Pinus densiflora* and *Abies holophylla*.

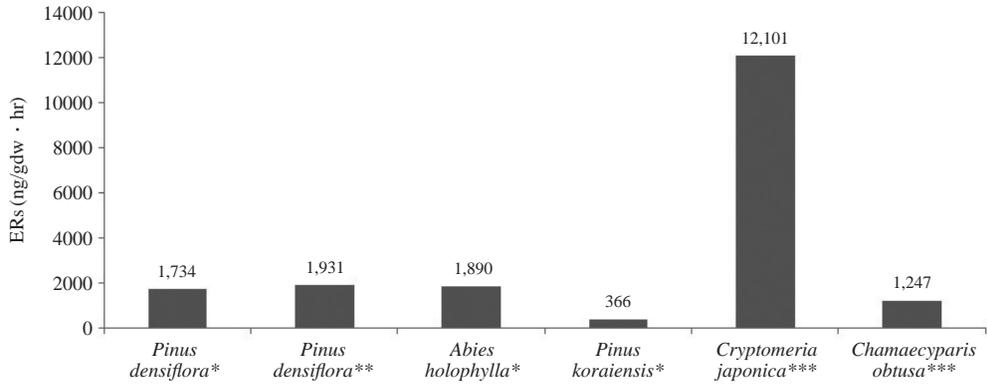


Fig. 6. Comparison of monoterpene ERs from conifers (*: This research; **: Lim et al., 2008; ***: Kim et al., 2005).

에 발생하는 모노테르펜의 표준배출속도 (Standard Emission Rate (ERs): 30°C, 1000 μmol/m²-sec 상태에서의 배출속도)를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 침엽수에서 배출되는 모노테르펜의 표준배출속도는 수종에 따라 상당히 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 표준배출속도는 삼나무 > 전나무 > 소나무 > 편백나무 > 잣나무 순으로 높다는 것을 알 수 있었다. 이 중 삼나무는 다른 침엽수에 비해서 거의 7~33배 정도 표준배출속도가 큰 것으로 나타나 삼나무 같은 수종이 수도권과 같은 대도시에 도시림으로 식재된다면 상대적으로 많은 오존이 형성되어 대기환경에 상당한 영향을 끼칠 것으로 사료된다. 한편, 소나무의 경우에는 본 연구와 선행 연구(Lim et al., 2008)의 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있었다.

활엽수에서 배출되는 이소프렌 표준배출속도가 그

림 7에 잘 나타나 있다. 활엽수의 경우에는 침엽수보다도 더 큰 수종간의 이소프렌 표준배출속도의 차이를 나타내고 있다. 이소프렌을 가장 많이 배출하는 줄참나무의 표준배출속도는 114,900 ng/gdw-hr이지만 반면에 현재 서울시 가로수의 상당 부분을 차지하는 은행나무(41%), 벚나무(7%), 느티나무(10%)의 경우는 이소프렌이 검출한계(2.51 ng) 이하로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이, 이소프렌 배출속도가 낮은 수종을 도시림으로 사용하면 생성되는 오존의 양을 상당히 감축시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 특히 서울시 가로수 중 두 번째로 많이 식재되어 있는 버즘나무(29%)는 다른 나무들에 비하여 이소프렌을 상당히 많이 배출하기 때문에 서울과 같은 수도권에서 지표면 오존 농도에 상당한 영향을 미칠 수 있을 것이라고 판단된다.

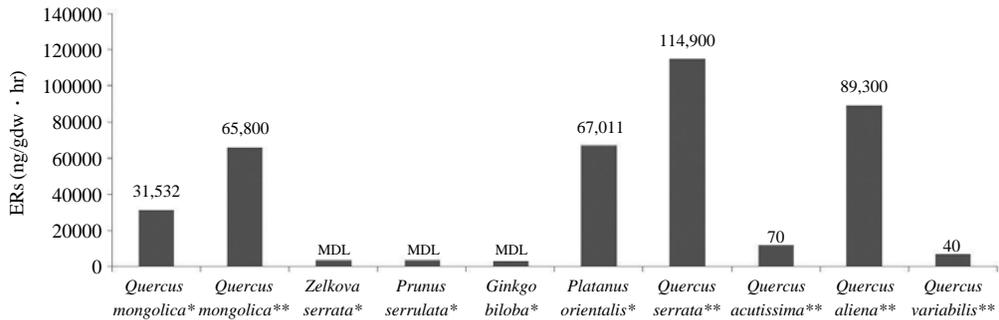


Fig. 7. Comparison of isoprene emission rates from broad-leaved tree (*: This research; **: Lim et al., 2010; MDL: Method detection limit).

4. 결 론

주요 온실가스이며 오존의 전구물질인 생물학적 VOC (BVOC)의 배출특성을 유효광합성량 (PAR)과 연계하여 연구하였다. 그리고 이러한 연구를 통해 수도권 대기 중의 오존 저감 방법을 제안하고자 하였으며, 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 오존 퍼텐셜 (Ozone potential)을 고려할 때 고려된 수종 중에서는 버즘나무, 신갈나무, 소나무, 전나무, 잣나무, 느티나무, 벗나무 순으로 오존 퍼텐셜이 감소하였다. 여기에서 전나무가 단순한 BVOC 관점에서는 소나무보다 배출속도가 더 높으나, 소나무가 반응성이 아주 높은 β-phellandrene과 myrcene 등을 더 많이 배출하기 때문에 OP는 더 높은 것으로 나타났다. 한편 버즘나무나 신갈나무는 느티나무나 벗나무에 비해 BVOC 배출량이 수천 배에서 수만 배 더 많이 발생하는 것으로 나타났다.

2. 온도변화에 직접적인 영향을 주는 PAR 증가 (500~1200 μmol/m²-sec)에 따른 수종별 BVOC의 배출경향을 보면 신갈나무와 전나무의 경우 PAR 증가에 따라 BVOC 배출량이 최대 10배 증가하는 것으로 나타났고, 일반적으로 활엽낙엽수에서 그러한 증가가 뚜렷하게 나타났다. 그러나 소나무 같은 침엽수림에서는 이러한 BVOC 증가 성향은 뚜렷이 나타나지 않았다.

이러한 결과들을 종합해 볼 때 느티나무의 경우에는 오존 발생 퍼텐셜도 극히 낮고 조정성도 좋아 본 연구에서 고려된 수종 중에서는 수도권의 도시림에

가장 적절한 수종이라고 판단된다. 그러나 본 연구는 단지 도시림의 대표적인 몇 가지 수종만을 고려한 경우이므로 좀 더 많은 수종에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

산림청 (2009) 전국도시림현황통계.
 서울시 (2011) 서울특별시 도시계획 조례 (서울특별시조례 제 5153호).
 이종현, 홍유덕, 이영재, 김록호, 이정영, 한진석 (2006) 서울과 부산의 오존 종관기상에 따른 기상인자 분석. 한국대기환경학회 추계학술 논문집.
 환경부 (2007) 도장시설의 VOC 배출억제를 위한 흡착-촉매산화 하이브리드 시스템개발.
 Atkinson, R. (2000) Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x, Atmospheric Environment, 34, 2063-2101.
 Benjamin, M.T. and A.M. Winer (1998) Estimating the ozone-forming potential of under trees and shrubs.
 Dominguez-Taylor, P., L.G. Ruiz-Suarez, I. Rosas-Perez, J.M. Hernández-Solis, and R. Steinbrechera (2007) Monoterpene and isoprene emissions from typical tree species in forests around Mexico City, Atmospheric Environment, 41, 2780-2790.
 Guenther, A. (1997) Seasonal and spatial variations in natural volatile organic compounds emissions, Ecological Application, 7(1), 34-45.
 Guenther, A., C.N. Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Kilnger, M. Lerdau, W.A. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecheter, R. Tallamraju, J. Taylor, and P.R. Zimmerman (1995)

- A global model of natural volatile organic compound emissions, *J. Geophys. Res.* 100, 8873-8892.
- Harrison, D., M.C. Hunter, A.C. Lewis, P.W. Seakins, T.V. Nunes, and C.A. Pio (2001) Isoprene and monoterpene emission from the coniferous species *Abies Borisii-regis*-implications for regional air chemistry in Greece, *Atmospheric Environment*, 35, 4687-4698.
- Kim, J.C., K.J. Kim, D.S. Kim, and J.S. Han (2005) Seasonal variations of monoterpene emissions from coniferous trees of different ages in Korea, *Chemosphere*, 59, 1685-1696.
- Kim, J.C., K.J. Kim, J.H. Hong, Y. Sunwoo, and S.G. Lim (2004a) A comparison study on isoprene emission rates from oak trees in summer, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, 20(1), 111-118.
- Kim, J.C., J.H. Hong, C.H. Gang, Y. Sunwoo, K.J. Kim, and J.H. Lim (2004b) Comparison on monoterpene emission rates from conifers, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, 20(2), 175-183.
- Kim, J.C. (2001) Factors controlling natural VOC emissions in a southeastern US pine forest, *Atmospheric Environment*, 35, 3279-3292.
- Kim, K.J., J.C. Kim, Y.J. Lim, Y.S. Son, Y. Sunwoo, and K.T. Cho (2007) A study on the isoprene emission rates from deciduous tree (*Quercus Mongolica* Fischer), *Journal of the Environmental Sciences*, 16(3), 269-275.
- Kuhn, U., S. Rottenberger, T. Biesenthal, A. Wolf, G. Schebeske, P. Ciccioli, E. Brancaleoni, M. Frattoni, T.M. Tavares, and J. Kesselmeier (2002) Isoprene and monoterpene emissions of Amazonian tree species during the wet season: Direct and indirect investigations on controlling environmental functions, *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 10.1029/2001JD000978.
- Lamb, B.K., A. Guenther, D. Gay, and H.H. Westberg (1987) A national inventory of biogenic hydrocarbon emissions, *Atmospheric Environment*, 21, 1695-1705.
- Lim, J.H., J.C. Kim, K.J. Kim, Y.S. Son, Y. Sunwoo, and J.S. Han (2008) Seasonal variations of monoterpene emissions from *Pinus densiflora* in East Asia, *Chemosphere*, 73, 470-478.
- Lim, Y.J., A. Armendariz, Y.S. Son, and J.C. Kim (2011) Seasonal variations of isoprene emissions from five oak tree species in East Asia, *Atmosphere Environment*, 45, 2202-2210.
- Owen, S.M., P. Harley, A. Guenther, and C.N. Hewitt (2002) Light dependency of VOC emissions from selected Mediterranean plant species, *Atmospheric Environment*, 36, 3147-3159.
- Padhy, P.K. and C.K. Varshney (2005) Emission of volatile organic compounds (VOC) from tropical plant species in India, *Chemosphere*, 41, 1643-1653.
- Paoletti, E., G. Seufert, G.D. Roca, and H. Thomsen (2007) Photosynthetic responses to elevated CO₂ and O₃ in *Quercus ilex* leaves at a natural CO₂ spring, *Environmental Pollution*, 147, 516-524.
- Son, Y.S., J.C. Kim, K.J. Kim, Y.J. Lim, Y. Sunwoo, and J.H. Hong (2006) A comparison study on isoprene emission rates from White Oak, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6), 791-798.
- Sun, E.J. and H.G. Leu (2004) Screening the subtropical trees for low isoprene emission in Taiwan. In: Proceedings of the 13th World Clean Air and Environment Protection Congress and Exhibition, International Union of Air Pollution Prevention and Environmental Protection Associations, 22-37.
- Tingey, D.T., M. Manning, L.C. Grothaus, and W.F. Burns (1980) Influence of light and temperature on monoterpene emission rates from slash pine. *Plant Physiol.*, 65, 797-801.
- Xiaoshan, Z., M. Yujing, S. Wenzhi, and Z. Yahui (2000) Seasonal variations of isoprene emissions from deciduous trees, *Atmospheric Environment*, 34, 3027-3032.
- Yokochi, Y. and Y. Ambe (1984) Factors affecting the emission of monoterpenes from Red Pine (*Pinus densiflora*), *Plant Physiol.*, 75, 1009-1012.