

Distribution characteristics on volatile organic compounds at the forest of Mt. mudeung and downtown

Dae-haeng Lee[★], Kang-soo Park, Se-hang Lee, Hyeong-myeong Song, Ki-won Lee,
Hee-yoon Jeong, Gwang-yeob Seo, Young-gwan Cho and Eun-sun Kim

Public Health & Environment Research Institute of Gwangju 502-243, Korea

(Received May 13, 2015; Revised June 16, 2015; Accepted June 16, 2015)

무등산 숲과 도심에서 휘발성유기화합물질의 분포 특성

이대행[★] · 박강수 · 이세행 · 송형명 · 이기원 · 정희윤 · 서광엽 · 조영관 · 김은선

광주광역시보건환경연구원

(2015. 5. 13. 접수, 2015. 6. 16. 수정, 2015. 6. 16. 승인)

Abstract: From 2013 to 2014, volatile organic compounds (VOCs) were analyzed to determine biogenic volatile organic compounds (BVOCs) and anthropogenic volatile organic compounds (AVOCs) at eight sites in Mt. Mudeung and one site in downtown, by using a GC/Mass-ATD (automatic thermal desorber). The concentration of terpene noted as biogenic volatile organic compounds at Pungamjeong (PA), in a forest of *Chamaecyparis obtusa*, was 821 pptv, which was the highest among the eight sites. This value was followed by Wonhyogyegok (WH: 785 pptv), Norritzae (NZ, coniferous forest: 679 pptv), Dongjeokgol (DJ, mixed species forest: 513 pptv), Jangbuljae (JB, *Abies koreana*: 476 pptv), and Seinbongsamgerri (SS, pine trees: 464 pptv). 11~15 species of terpene was detected in the forest depending on the site. At PA in May, α -pinene showed the highest value, occupied 20% of terpene followed by coumarin, sabinene, phellandrene, myrcene, borneol, eucalyptol, β -pinene, cymene, δ -limonene, γ -terpinene, camphor, camphene, and mentol in the order. The mean concentrations of AVOCs were 0.74~2.52 ppbv in the forests and 3.14 ppbv in the downtown area. From May to July, the AVOCs ratios of the downtown to each forest were 1.9~4.0. Among 10 species of AVOCs, the sum of toluene and benzene was 2.34 ppbv and occupied 75%. In June, the ratios of toluene were 44.1% at DJ site and 53.1% at JW site (downtown). The BVOCs showed a positive correlation with the AVOCs at the forest sites ($r = 0.328$), which was statistically insignificant ($p = 0.184$).

요약: 무등산 탐방로 8개 지점과 도심 1개 지점에서 2013~2014년에 자연 기원 휘발성유기화합물질 (BVOCs)과 인위적인 휘발성유기화합물질 (AVOCs)의 분포특성을 GC-MSD를 사용하여 조사하였다. 자연 기원 휘발성유기화합물질인 테르펜 발생량은 편백숲인 PA 지점이 821 pptv으로 가장 높았고, WH 지점이 785 pptv, NZ 지점이 679 pptv, DJ 지점이 513 pptv, JB 지점이 476 pptv, SS 지점이 464 pptv 순

[★] Corresponding author

Phone : +82-(0)62-613-7581 Fax : +82-(0)62-613-7629

E-mail : ldh0928@korea.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

으로 조사되었다. 테르펜은 지점별로 11~15 종이 검출되었는데, 5월에 PA 지점에서는 α -pinene이 20%로 가장 높고, coumarin, sabinene, phellandrene, myrcene, borneol, eucalyptol, β -pinene, cymene, δ -limonene, γ -terpinene, camphor, camphene, mentol 순이었다. 인위적인 휘발성유기화합물질(AVOCs)은 5~7월에 숲 8개 지점에서 0.74~2.52 ppbv 이었고, 도심(JW 지점)에서는 3.14 ppbv로 나타나 도심/산림 비율은 1.9~4.0로 도심지역이 높았다. JW 지점에서 벤젠과 톨루엔만 합한 농도는 평균 2.37 ppbv로 AVOCs 10항목 전체의 75%를 차지했다. 6월 중 AVOCs 중별 분포조사 결과, 숲인 DJ 지점에서 toluene이 44.1%로 가장 많았고, 도심인 JW 지점에서도 toluene이 53.1%로 가장 많았다. 또한, 숲에서 AVOCs와 BVOCs 농도의 상관성 분석 결과, 양의 상관계수가 0.328이나 유의인자(p)는 0.184로서 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타나 숲에서의 AVOCs는 도심에서 영향을 받은 것으로 추정된다.

Key words: biogenic volatile organic compounds, anthropogenic volatile organic compounds, terpene, forest, downtown

1. 서 론

숲에서 휘발성유기화합물질(VOCs)은 자연에서 기원하는 BVOCs(Biogenic Volatile Organic Compounds)과 인위적인 배출원 (AVOCs, Anthropogenic Volatile Organic Compounds)으로 구분하는데, 숲은 치유의 효능을 가지고 있는 BVOCs를 주로 배출하며 AVOCs는 대부분이 자동차나 공장 굴뚝 배출가스로부터 배출된다. 자연의 치유 요소인 피톤치드, 음이온, 경관, 빛 중에서도 항균작용이나 소취작용을 가지고 있는 피톤치드 물질의 하나인 테르펜 물질에 대한 연구가 최근 다양하게 진행되어 왔다.¹⁻⁵ 숲이 심리적 안정감을 주고, 숲에서의 활동이 긴장 이완과 스트레스 감소 등으로 혈압과 맥박수를 저하시키는 효과가 있으며, 숲에서 발생하는 방향성 물질인 테르펜이 항생과 항종양성, 혈압 강하 등의 다양한 인체보건 효과가 있고, 산림휴양이 사람들의 우울증을 현저하게 감소시켜 자아실현에서 긍정적인 변화를 가져다 준다는 것을 밝히는 다양한 연구들이 수행되었다.⁶⁻⁹

국내에서 치유의 숲으로 유명한 장성 축령산과 장흥 우드랜드, 덕유산, 지리산, 남해지역에서 건강치유물질에 대한 연구가 이미 수행되어 지금은 많은 관광객이 찾는 유명 관광지로 각광을 받고 있기도 한다.¹⁰⁻¹¹ 무등산은 100만 명 이상의 인구가 거주하는 광주광역시에 위치한 1,000 m가 넘는 산으로서 2013년에 국립공원으로 승격되었고, 해마다 많은 등산객이 즐겨 찾는 곳이다. 2011년부터 2012년까지 무등산 주요 탐방로에 대한 건강치유물질 중 테르펜에 대한 연구를 수행하였으며, 테르펜과 기상인자와의 상관성분석은 물론

주요 지점에서의 테르펜 분포를 조사하여 계절과 기상의 중요성에 대한 연구를 수행하였다.¹²⁻¹³ VOCs는 질소산화물이 존재 시 태양광의 광화학반응에 의해 오존(O₃)이나 PAN(peroxyacetyl nitrate) 등의 물질을 생성하여 환경에 영향을 준다.¹⁴⁻¹⁶ 최근에는 도심에서 고농도 오존 발생시 VOCs의 거동 특성에 대한 연구와 숲에서 BVOCs가 오존 생성에 기여하는 원인 규명 등에 대한 연구가 수행되어 오고 있다.¹⁷ 그러나 숲에서 BVOCs를 조사하거나 도심에서 AVOCs를 조사하는 지역적인 구별된 연구를 수행하였지만, 숲에서 BVOCs와 AVOCs의 농도 분포 및 상관성에 대한 연구를 수행한 경우는 매우 미미하다.

따라서 본 연구에서는 무등산 숲에서의 BVOCs와 AVOCs에 대한 농도를 측정하고, 건강치유에 기여하는 BVOCs의 주종인 테르펜의 중별 분포를 파악하였으며, 도심에서와 숲에서의 AVOCs 농도를 비교분석하였고, 숲에서의 AVOCs와 BVOCs의 상관성을 분석하여 AVOCs의 기원에 대하여 알아보하고자 하였다. 따라서 대기 중의 오존생성에 기여하는 휘발성유기화합물질의 영향 연구에 대한 유익한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 조사대상 및 지점

조사기간은 2013년 3월 27일부터 2014년 10월 10일까지이고, 봄과 여름을 중심으로 연구하였으며, 무등산 주요 탐방로와 편백, 구상나무, 소나무 등이 식재된 지역을 대상으로 월별로 오전 10시부터 오후 6시까지 조사하였다. 2013년에는 3지점에서, 2014년에



Fig. 1. Sampling sites of this study at Mt. Mudeung.

는 5지점에서 BVOCs인 테르펜류 20종과 톨루엔 등 AVOCs 10종, 기온, 상대습도, 대기압 등 33개 항목에 대한 분석을 실시하였다. 세부 조사지점은 2013년에 풍암정 (PA), 원효계곡 (WH), 너릿재 (NZ) 등 3지점, 2014년에는 동적골 (DJ), 새인봉삼거리 (SS), 중봉 (JB), 충장사 (CJ), 돌샘약수터 (DS) 등 5지점이고, 대조군으로 도심의 주월동측정소 (JW)에서 2014년에 VOCs를 조사하였다.

2.2. 조사지역의 특징

무등산 PA 지점은 주로 편백이 식재되어 있고 공기의 흐름이 적으며, WH 지점은 혼효림으로 계곡에 위치해 있어 바람에 의해 주변 산림의 영향을 많이 받았다. NZ 지점은 편백과 삼나무가 사면에 식재되어 있어 테르펜 물질의 외부로의 확산이 용이했다. DJ 지점은 편백과 소나무를 포함한 활엽수가 혼재되어 있고, 고도가 다른 지점보다 낮아 바람의 흐름이 약하며, SS 지점 주변은 소나무가 있고 능선에 위치해 있어서

바람이 다소 부는 곳이다. JB 지점은 위치가 900 m 정도로 가장 높아 기상의 영향을 받지만 5~10 m 정도 낮은 수고의 구상나무가 밀집해 있어 테르펜 물질이 하부에 잔류할 수가 있었고, DS 지점은 고도가 470 m로 높고 편백이 사면에 위치하여 테르펜 물질이 쉽게 확산될 수 있는 지형이었으며, CJ 지점은 고도가 290 m로 동산모형에 40~50여 그루의 소나무가 위치해 있었다. 대조군인 JW 지점은 도심 중앙에 위치해 있고 주변에 나무가 없어 NVOC가 거의 검출되지 않았고, 주변 도로의 자동차 영향으로 AVOCs의 농도가 높았다. NVOCs의 농도가 가장 높았던 때의 기온과 대기압 평균은 Table 1과 같고, 표준상태의 조건에 실제 기온과 대기압 값을 입력하여 물질의 농도를 산정하였다. PA 지점에서 오전 11시경 월별 기온의 변화를 살펴보면, 3월 27일에 16.1 °C, 5월 21일에 22.0 °C (봄), 7월 18일에 27.7 °C (여름), 9월 26일에 20.2°C (가을), 11월 19일에 8.9 °C (초겨울)로 이병설의 사계절 기준에 따르면 계절이 확연히 구분되었다.¹⁸

Table 1. Ambient Temperature and atmospheric pressure at sampling sites where the terpene concentration was the highest during March to October

Site	PA	WH	NZ	DJ	JB	SS	DS	CJ
Date	21-May-13	21-May-13	22-Jul-13	13-May-14	16-Jun-14	13-May-14	19-May-14	16-Jun-14
Temp. (°C)	21.0	22.6	28.2	22.5	26.8	23.9	22.0	25.5
Pressure (mmbar)	987	966	985	992	911	963	959	977

2.3. 시료 채취 및 분석

시료채취에 사용된 흡착관은 Tenax TA (150 mg)와 Carbopack B (130 mg)가 충전된 Stainless steel tube (ϕ 5 mm, L 90 mm)로서, 질소가스를 흘려보내면서 300 °C에서 2 시간 이상 전처리한 후 밀봉용 캡을 씌우고 지퍼형 비닐 팩에 넣어 보관하여 외부 물질에 의한 오염을 최소화 하였고, 시료채취 전에 흡착관 blank test를 수행하여 주변 환경의 오염 유무를 확인 하였다.¹²

시료채취 시간은 오전 10시부터 18 시까지이고 흡착관을 시료채취기에 장착한 후 BVOCs (테르펜류)는 분자량이 크고 비점이 높으므로 100 mL/min의 유속으로 2 시간 동안, AVOCs는 분자량이 작고 비점이 낮으므로 동일한 유속으로 30분간을 흡착관에 흡착시켜서 시료채취과정에서의 손실을 최소화 하였다. 시료채취는 실내공기질공정시험기준에 의해 지면으로부터 1.2~1.5 m 지점에서 수행하였고, 시료채취 후에는 밀봉용 캡을 씌워서 아이스박스에 넣어 실험실로 이동 후 분석하였다.¹⁹

VOCs 분석에 사용된 장비와 시료채취 및 분석조건은

Table 2와 같으며, 질량분석기의 분석관 압력은 10^{-6} torr 의 고진공 상태를 유지하여 분석이 안정적으로 이루어지도록 하였다. 흡착관에 흡착된 물질은 열탈착기 (ATD)에 의해 -30 °C이하에서 저온 농축되고, 농축된 물질은 다시 300 °C에서 10 분간 열탈착되어 GC 컬럼으로 주입되고 질량분석기에서 SIM 모드로 정성 및 정량 분석된다.²⁰ 이 때 GC/MSD의 BVOCs 물질별 선택 질량값은 Table 3과 같다. BVOCs의 분석항목은 α -pinene, camphene, sabinene, myrcene, β -pinene, 2-carene, phellandrene, α -terpinene, cymene, δ -limonene, eucalyptol, γ -terpinene, α -terpinolene, linalol, camphor, mentol, borneol, citral, thymol, coumarin 등이고, AVOCs는 benzene, toluene, ethylbenzene, chlorobenzene, styrene, m,p-xylene, o-xylene, m-dichlorobenzene, p-dichlorobenzene, o-dichlorobenzene 등이다.

테르펜 분석용 표준용액은 Aldrich사와 Fluka사의 1차 표준물질을 정밀천칭을 사용하여 일정한 양을 투입하여 20 종 표준용액의 농도는 모두 다르게 조제 되었다. 테르펜 대표 종의 표준액 농도는 α -pinene (1.6, 4.0, 8.0, 16.0, 40.0 μ g/mL), β -pinene (1.8, 4.6, 9.1, 18.2,

Table 2. Sampling and analytical conditions for VOCs

Items	Material	Conditions	Sampler or Analyzer/Maker
Sampling	BVOCs	2 hr \times 100 mL/min	Auto (STS-25/PerkinElmer) or Manual (MP- Σ 30KN/Sibata)
	AVOCs	30 min \times 100 mL/min	
TD (Thermal desorber)	Both	Column flow 1.5 mL/min " pressure 5.0 psi Tube desorb. -30 °C \times 10 min	TD (TurboMatrix 650/PerkinElmer)
GC	Both	Column (60 m \times 0.32 mm \times 3 μ m) 50 °C (5 min) \rightarrow 8 °C/min \rightarrow 250 °C (8 min)	GC (Clarus 680/PerkinElmer)
Mass	Both	SIM mode	MS (Clarus SQ8T/PerkinElmer)

※SIM (Selected Ion Monitoring)

Table 3. Selected mass of SIM mode in analyzing terpene compounds

Compounds	SIM mass	Compounds	SIM mass
α -pinene	93, 121, 136	Eucalyptol	108, 139, 154
Camphene	93, 107, 121	γ -terpinene	93, 121, 136
Sabinene	93, 136	α -terpinolene	91, 121, 136
Myrcene	69, 93	Linalool	71, 93, 109, 121
β -pinene	79, 93, 121	Camphor	95, 108, 152
2-carene	93, 121, 136	Mentol	71, 95, 123, 138
Phellandrene	93, 119, 136	Borneol	95, 110, 139
α -terpinene	93, 121, 136	Citral	69, 137, 152
cymene	91, 119, 134	Thymol	135, 150
δ -limonene	68, 93, 107	Coumarin	118, 146

Table 4. Instrumental detection limit (IDL) and relative standard deviation (RSD) for the analysis of terpene by gas chromatography (n=7)

Species	α -pinene	β -pinene	Cymene	Phellandrene	Camphor
IDL ($\mu\text{g/mL}$)	0.31	0.43	0.53	0.42	0.13
RSD (%)	7.1	13.2	12.5	15.9	8.2

45.6 $\mu\text{g/mL}$), cymene (3.4, 8.4, 16.8, 33.6, 84.0 $\mu\text{g/mL}$), phellandrene (2.8, 7.1, 14.1, 28.3, 70.7 mg/mL), camphor (1.9, 4.7, 9.4, 18.7, 46.9 $\mu\text{g/mL}$) 이었고 검량선에 대한 결정계수(r^2)는 0.99 이상이었다. 테르펜 물질에 대한 GC의 기기검출한계(IDL)는 최소농도의 표준용액을 7회 반복 분석 후 측정하였고, 기기검출한계와 상대표준편차(RSD)는 Table 4와 같고, 정확도는 88.3~109.3% (n=7) 이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조사지점에서 테르펜 농도 분포

무등산 8개 지점에서 2013년 3월부터 2014년 10월까지 테르펜 농도를 조사한 결과는 Table 5와 같다. 오전 10~12 시까지와 오후 2~4 시까지 측정한 값을 평균하여 테르펜 농도가 가장 높은 시기는, PA 지점에서는 5월에 821 pptv(parts per trillion volume), WH 지점에서는 5월에 785 pptv, NZ 지점에서는 7월에 679 pptv 이었고, DJ 지점에서는 5월에 513 pptv, JB 지점에서는 6월에 476 pptv, SS 지점에서는 5월에 464 pptv, CJ 지점에서는 6월에 307 pptv, DS 지점에서는 5월에 299 pptv 이었다. PA 지점은 편백림 조성 지역으로 낮은 지역에 위치해 있고 바람이 많이 없는 지역으로 농도가 가장 높았고, WH 지점은 계곡으로서 숲의 중심부에 위치해 있고 침엽수와 활엽수가 혼재하는 곳으로 타 지역에 존재하는 테르펜이 이동하여 농도를 높여주는 지역특성을 가지고 있었다. NZ

지점은 편백과 삼나무가 인공적으로 조림된 지역이지만 사면에 위치하여 외부로 확산이 용이하였고, DJ 지점은 편백과 소나무 및 활엽수가 혼재하는 계곡 지역으로 흩어짐이 적어 고도가 높고 구상나무가 있는 JB 지점이나 능선에 위치해 있어 확산이 쉬운 SS 지점보다는 농도가 높았다. 테르펜 중 α -pinene 농도만 비교할 경우, DJ 지점에서 오전에 381 pptv로 공 등이 연구한 남해 (324 pptv), 거제 (240 pptv) 등과 비슷하여 치유의 숲으로서 가치가 있었다.¹¹

Rivoal 등에 의하면 나무에서 테르펜의 방출속도가 여름에 가장 높고 봄, 가을 순이라고 보고하였는데, 조사지점에서도 여름과 늦봄에 농도가 가장 높았다.²¹ 2013년에는 편백이 있고 바람의 흐름이 거의 없는 PA 지점이 가장 높고, 2014년에는 고도가 가장 낮은 지역에 위치해 있고 편백과 소나무 등이 혼재된 DJ 지점이 가장 높았다(Table 5). 하지만 2012년에 조사한 무등산 제1수원지 편백림이나 삼나무 지역에 비해서는 낮은 테르펜 농도를 보였다.⁷

3.2. 테르펜 종별 농도 분포

조사지점에서 테르펜 종별 농도 분포를 살펴보면, 식물의 대사작용이 활발한 2013년 5월에 PA 지점은 14종이 검출되었는데 α -pinene이 20%로 가장 높고, coumarin (12%), sabinene (10%), phellandrene (8%), myrcene (7%), borneol (6%), eucalyptol (6%), β -pinene (6%), cymene (6%), δ -limonene (5%), γ -terpinene (4%), camphor (4%), camphene (4%), mentol (2%) 순이었으

Table 5. Variation of terpene concentration in terms of month at 8 sites

Month	PA	WH	NZ	DJ	JB	SS	CJ	DS
March	51	63	309	361	215	136	301	226
April	626	352	385	415	350	364	270	285
May	821	785	334	513	420	464	215	299
June	491	419	280	345	476	307	307	267
July	383	572	679	256	312	207	135	146
August	379	559	447	210	160	175	130	150
September	246	224	206	208	190	205	153	186
October	44	208	29	49	89	27	40	51

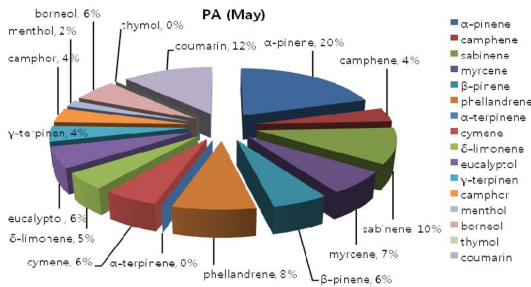


Fig. 2. Concentration ratio of terpene materials at PA in Mt. Mudeung.

며, WH 지점은 15 종, NZ 지점은 11종이 검출되었다 (Fig. 2). 이는 잎 등이 금성산 소나무에서 조사한 물질구성비 중 α-pinene (봄, 34%)이 가장 높았던 것과는 일치하지만 수종에 따른 다양성으로 다른 물질의 구성비가 일치하지는 않았다.¹⁸ 식물에서 배출되는 BVOCs로는 이소프렌, 테르펜, 알콜, 카르보닐화합물, 에스테르 등 여러 종이 있으며, 이런 배출원이 광화학반응에 의해 오존을 생성하는 역할을 함으로 인해 치유물질로 작용할 뿐만 아니라 대기질 변화에도 영향을 준다는 점을 연구자들이 연구를 수행해 오고 있다.^{22,24}

2014년 6월 중 DJ 지점은 14 종의 테르펜이 검출되었는데, α-pinene이 27.6%로 가장 농도가 높았으며, SS 지점은 15 종, JB 지점은 14 종, DS 지점은 15 종, CJ 지점은 14 종의 테르펜이 검출되었는데, 전반적으로 monoterpene인 α-pinene이 가장 높은 농도로 검출되었고, coumarin, sabinene, β-pinene, camphor, δ-limonene, phellandrene 등의 순으로 검출되었다(Fig. 3).

3.3. 인위적 휘발성유기화합물질 (AVOCs) 농도 분포

무등산 8 개 지점과 도심인 JW 지점에서 5~7월 중 오전과 오후에 AVOCs 농도를 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. PA 지점은 평균 3.4 μg/m³(0.74 ppbv)

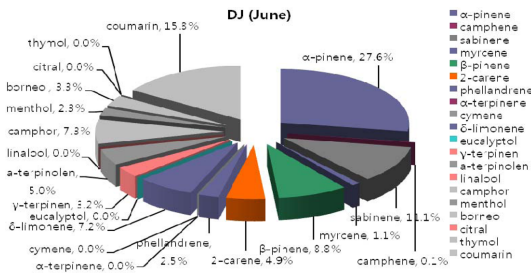


Fig. 3. Concentration ratio of terpene materials at DJ in Mt. Mudeung.

로 가장 낮았고, DJ 지점은 평균 3.5 μg/m³(0.76 ppbv), JB 지점은 3.8 μg/m³(0.99 ppbv), DS 지점은 4.2 μg/m³(1.06 ppbv), SS 지점은 4.9 μg/m³(1.18 ppbv), SJ 지점은 5.0 μg/m³(1.20 ppbv), NZ 지점은 5.4 μg/m³(1.30 ppbv), CJ 지점은 7.0 μg/m³(2.52 ppbv)로 조사되었는데, CJ 지점에서 농도가 높은 이유는 주변 50여 m 거리에 차도가 있어서 자동차 배출가스의 영향을 받았을 것으로 판단된다(Fig. 1).

무등산 숲에서 5~7월 중 AVOCs 10 개 항목에 대한 평균농도는 0.74~2.52 ppbv이고, 톨루엔과 벤젠만을 합한 평균농도는 0.4~1.45 ppbv로서 김기준 등이 금성산에서 조사한 톨루엔과 벤젠을 합한 농도 0.31~1.06 ppbv와 유사한 결과를 보여 주었다.²⁵ 편백이나 소나무의 정유인 테르펜 물질이 아민 등의 휘발물질과 반응해서 59~73%까지 제거하는 효과가 있는 것으로 보고되어 있는데,²⁶ PA 지점과 DJ 지점 등 테르펜 농도가 높은 지역에서 AVOCs 농도가 낮은 것은 도로변과의 이격 거리 및 차량 통행이 적은 것과 연관이 있는 것으로 추정된다.

도심지역인 JW 지점에서 5~7월까지 평균 AVOCs는 13.5 μg/m³(3.14 ppbv)으로 매우 높았으며, AVOCs의 도심/산림 비율은 1.9~4.0 정도로 도심지역이 높았다. 대부분 도시지역의 톨루엔과 벤젠만을 합한 농도 범위가 3.0~14.1 ppbv 이고, 서울특별시 광화문 근처에서 1998년에 측정된 결과 톨루엔 (10.6 ppbv)과 벤젠 (1.1 ppbv)의 농도 합이 11.7 ppbv 이었는데, 광주 지역 도심 도로변에서 20~50 m 거리에 위치한 JW 지점에서 톨루엔과 벤젠을 합한 농도는 5~7월에 0.60~4.69 ppbv (평균 2.37 ppbv)로 AVOCs 10항목의 75%에 해당하고, 전체도시 평균 농도에서도 낮은 범위에 있음을 알 수 있다. 대체적으로 산림에서의 AVOCs는 도시의 공장이나 자동차 등의 인위적인 요인에 의해 발생된 물질이 대기 확산에 의해 산림에 까지 영향을 준 것으로 알려져 있다.²⁷

무등산 DJ 지점에서 2014년 6월 13일 오후 2시에

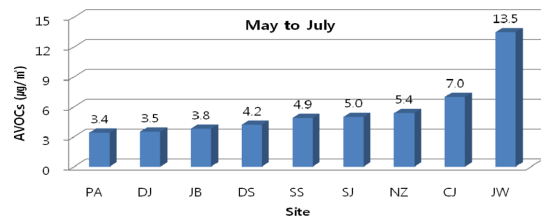


Fig. 4. AVOCs concentration at sampling sites of Mt. Mudeung and downtown during May to July in 2013-2014.

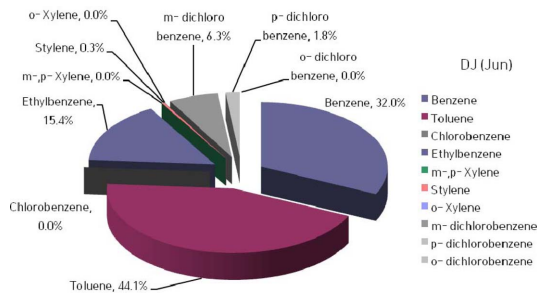


Fig. 5. Concentration ratio of AVOCs materials at DJ site of Mt. Mudeung.

AVOCs 10종에 대한 분포를 조사한 결과, toluene이 44.1%로 가장 많았고, benzene (32%), ethylbenzene (15.4%), 1,3-dichlorobenzene (6.3%), 1,4-dichlorobenzene (1.8%), styrene (0.3%) 순이었으며, m,p-xylene, o-xylene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene은 검출되지 않았다 (Fig. 5). Benzene은 주로 도시지역 자동차와 관련하여 배출되고, Toluene은 유기용제 사용과 관련하여 배출되는 대표적인 물질이다.²⁸

2014년 6월 13일 오후 2시에 SS지점에서 AVOCs 분포를 조사한 결과, toluene이 47.4%로 가장 많았고, benzene (28.2%), styrene (10.9%), ethylbenzene (7.8%), 1,3-dichlorobenzene (4.4%), 1,4-dichlorobenzene (1.2%) 순이었으며, m,p-xylene, o-xylene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene은 검출되지 않았다. CJ 지점에서는 toluene이 62.2%로 가장 많았고, benzene (18.2%), ethylbenzene (15.8%), 1,3-dichlorobenzene (2.9%), 1,4-dichlorobenzene (0.9%) 순이었으며, styrene, m,p-xylene, o-xylene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene은 검출되지 않았다. DS지점에서는 toluene (55.4%), benzene (17.2%), ethylbenzene (12.5%), styrene (8.4%), 1,3-dichlorobenzene (3.7%), o-xylene (1.5%), 1,4-dichlorobenzene (1.2%) 순이었으며, m,p-xylene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene은 검출되지 않았다. 2014년 6월 16일 오후 2시에 도심인 JW 지점에서는 toluene이 53.1%로 가장 많았고, ethylbenzene (16.7%), benzene (14.6%), m,p-xylene (9.9%), styrene (3.7%), 1,3-dichlorobenzene (1.6%), 1,4-dichlorobenzene (0.4%) 순이었으며, o-xylene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene은 검출되지 않았다 (Fig. 6). 대부분 지역에서 toluene 농도가 가장 높고, benzene과 ethylbenzene이 그 다음으로 검출되었는데, 이는 도심지역의 영향을 많이 받은 것으로 추정된다.¹⁵

2014년 7월 30일 오후 2시에 도심지역인 JW 지점

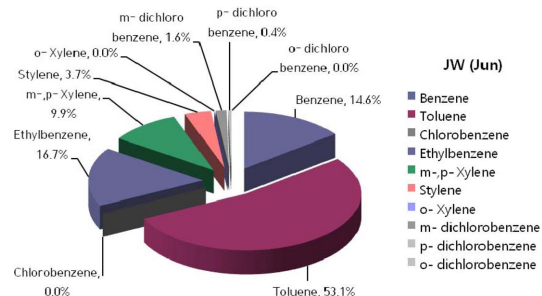


Fig. 6. Concentration ratio of AVOCs materials at JW site of downtown.

에서는 toluene이 $0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (26.8%), benzene이 $0.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (18.2%), o-xylene이 $0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (17.8%), m,p-xylene이 $0.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (16.0%), ethylbenzene이 $0.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (14.1%), styrene이 $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (6.2%) 순이었으며, 1,3-dichlorobenzene, 1,4-dichlorobenzene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene은 검출되지 않았다. 전반적으로 산림이나 도심 모두에서 toluene이 가장 높은 농도로 검출되고, benzene, ethylbenzene, styrene, 1,3-dichlorobenzene, m,p-xylene, o-xylene 등이 검출되지만, 기온이나 강우 등의 기상에 영향을 받아 휘발성유기화합물 질별 농도가 변할 수 있고, 1,4-dichlorobenzene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene 등은 거의 검출되지 않았다.

3.4. 휘발성유기화합물질간의 상관성 분석

2014년 무등산 숲에서 3월부터 8월까지 5개 지점에서 측정된 휘발성유기화합물질 농도에 대한 상관성 분석을 위해 통계프로그램 SPSS(ver. 20)로 Pearson 상관분석을 실시하였으며, 그 결과, AVOCs와 BVOCs

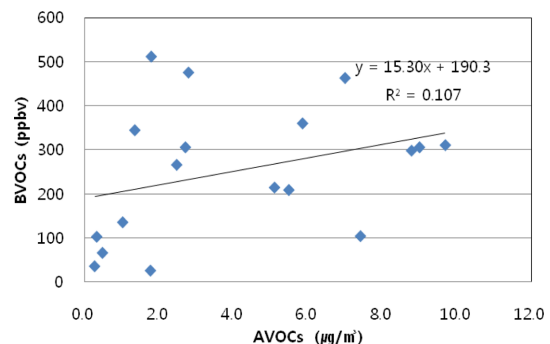


Fig. 7. Correlation analysis between concentrations of AVOCs and BVOCs at Mt. Mudeung.

의 상관계수는 0.328 ($r^2=0.107$)로서 양의 상관성을 보이나, 유의인자(p)는 0.184로서 유의수준 0.1에서도 유의하지 않은 것으로 분석되었다. 이는 인위적인 휘발성유기화합물질이 자연적인 휘발성유기화합물질처럼 숲 속에서 발생했다기 보다는 도심에서 발생한 것이 공기의 흐름에 의해 숲으로 이동했다고 추정할 수 있다(Fig. 7).

4. 결 론

무등산 탐방로 8개 지점과 도심 1개 지점에서 자연 기원 휘발성유기화합물질(BVOCs)과 인위적인 휘발성유기화합물 (AVOCs)의 종별 분포를 조사하여 상관성을 분석한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

무등산 조사지점에서 BVOCs (테르펜)의 평균 농도를 분석한 결과, PA 지점이 821 pptv로 가장 높았고, WH 지점이 785 pptv, NZ 지점이 679 pptv, DJ 지점이 513 pptv, JB 지점이 476 pptv, SS 지점이 464 pptv 순으로 조사되었다. BVOCs의 종별 분포를 살펴보면, 2013년 5월에 PA 지점은 14종이 검출되었는데, α -pinene이 20%로 가장 높고, coumarin, sabinene, phellandrene, myrcene, borneol, eucalyptol, β -pinene, cymene, δ -limonene, γ -terpinene, camphor, camphene, mentol 순이었으며, 지점별로 11~15 종의 테르펜 물질이 검출되었다.

무등산 숲 8개 지점에서 5~7월에 AVOCs 평균 농도는 0.74~2.52 ppbv로 조사되었고, 도심인 JW 지점에서는 3.14 ppbv로 조사되어 AVOCs의 도심/산림 비율은 1.9~4.0 정도로 도심지역이 높았다. JW 지점에서 벤젠과 톨루엔만 합한 농도는 평균 2.37 ppbv로 10항목 전체의 75%를 차지했다. DJ 지점에서 6월 중 AVOCs 10종에 대한 분포조사 결과, toluene이 44.1%로 가장 많았고, benzene, ethylbenzene, 1,3-dichlorobenzene, 1,4-dichlorobenzene, styrene 순이었으며, m,p,o-xylene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene은 검출되지 않았다. 대부분의 숲 지점에서 toluene농도가 가장 높은 것은 도심지역의 영향을 받은 것으로 추정된다. 도심인 JW 지점에서도 toluene이 53.1%로 가장 많았고, ethylbenzene, benzene, m,p-xylene 순으로 일반적인 도시에서와 유사하였다.

2014년 무등산 5개 지점에서 측정한 휘발성유기화합물질 농도에 대한 상관성 분석 결과, AVOCs와 BVOCs의 상관계수는 0.328로서 양의 상관성을 보이나, 유의인자(p)는 0.184로서 유의수준 0.1에서 유의하

지 않아 숲에서 측정된 AVOCs는 도심에서 영향을 받은 것으로 추정된다.

감사의 글

이 논문은 2013~2014년도 환경부 “환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축” 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

References

1. J. C. Kim, J. H. Hong, C. H. Gang, W. Y. Sun, K. J. Kim and J. H. Lim, *J. Kor. Soc. for Atmos. Environ.*, **20**(2), 175-183 (2004).
2. D. Harrison, M. C. Hunter, A. C. Lewis, P. W. Seakins, T. W. Nunes and C. A. Pio, *J. Kor. Soc. for Atmos. Environ.*, **35**, 4687-4698 (2001).
3. M. Staudt, N. Bertin, U. Hansen, G. Seufert, P. Ciccioli, P. Foster, B. Frenxel, J. L. Fugit and L. Torres, *J. Kor. Soc. for Atmos. Environ.*, **31**, 145-156 (1997).
4. J. C. Kim, *J. Kor. Soc. for Atmos. Environ.*, **35**, 3279-3292 (2001).
5. J. C. Kim, *J. Kor. Soc. for Atmos. Environ.*, **17**(E2), 61-70 (2001).
6. K. W. Kim, *J. Kor. Soc. for Plant Human Environ.*, **9**(4), 111-123 (2006).
7. M. J. Kim, Y. H. Choi, J. W. Lee, B. J. Park and Y. J. Jeon, *J. Kor. Soc. of Environ. and Ecology proceeding thesis*, 97-101 (2007).
8. W. S. Shin and S. G. Kim, *J. Kor. Forest Soc.*, **96**(2), 203-207 (2007).
9. Korea forest Research Institute, ‘Development of Health Healing Program using Forest’, Korea Forest Service (2011).
10. Jeonnam Institute of Health and Environment, Research Seminar for Health and Environment, 65-81 (2008).
11. N. S. Kong, H. S. Choi, J. H. Byun, J. S. Park, H. Y. Lee, The Report of Health and Environment Research Institute of Gyungnam, 153-169 (2010).
12. D. H. Lee, M. H. Kim, H. J. Seo, G. W. Min, S. H. Kim, G. Y. Seo, W. S. Jeong, Y. J. Kang, K. W. An, K. J. Baik, Y. W. Moon and E. S. Kim, *J. Environ. Sci.*, **21**(10), 1221-1234 (2012).
13. D. H. Lee, M. H. Kim, O. H. Park, K. S. Park, S. S.

- An, H. J. Seo, S. H. Jin, W. S. Jeong, Y. J. Kang, K. W. An and E. S. Kim, *J. Environ. Health Sci.*, **39**(3), 211-222 (2013).
14. M. S. Her, 'Characteristics of VOCs' Behavior in air during High Concentration Ozone in Summer', Master Dissertation, Seoul National University, Seoul (2007).
15. G. Y. Her, 'Long-term Analysis of Ozone Concentration on the Ground of Seoul Area using KZ Filter', Master Dissertation, Seoul National University, Seoul (2000).
16. H. J. Jeong, 'A Study on the Development of Ozone Forecast System and the Variation of Ozone Concentration by Photochemical Reaction at the air of Daejeon Area', Ph. D. Dissertation, Wongwang University, Jeonju, Jeollabukdo (2001).
17. J. H. Lim, 'A Comparison Study on Emission Rates of Natural VOC from Coniferous Trees', Master Dissertation, Gunguk University, Seoul (2004).
18. B. S. Lee, A Study on Natural Season of Korea, *Geography*, **14**(2), 1-11 (1979).
19. Ministry of Environment, Indoor Air Pollution Test Method, 17-22 (2010).
20. Ministry of Environment, Air Pollution Test Method, 862-863 (2008).
21. A. Rivoal, C. Fernandez, A. V. Lavoit, R. Olivier, C. Lecareux, S. Greff, P. Roche and B. Vila, *Chemosphere*, **78**, 942-949 (2010).
22. D. Y. Ji, S. Y. Kim and J. S. Han. *J. Kor. Soc. for Atmos. Environ.*, **18**(6), 515-525 (2002).
23. H. C. Kim and K. H. Lee, *J. Kor. Soc. for Environ. Sci.*, **19**(5), 627-637 (2010).
24. National Institute of Environmental Research, Final Report (2012), Korea University, 1-41, Republic of Korea.
25. G. J. Kim, J. C. Kim and J. H. Lim, *J. Kor. Soc. for Environ. Analysis*, **8**(3), 132-136 (2005).
26. H. Y. Kang, 'The Secret of Phytoncide', History-Net Press, 66-68 (2003).
27. D. H. Lee, S. S. An, H. M. Song, O. H. Park, K. S. Park, G. Y. Seo, Y. G. Cho and E. S. Kim, *Environ. Health Sci.*, **40**(3), 204-214 (2014).