

서울시 녹지공간 공기 중 피톤치드 농도 특성

대기환경팀

이제승 · 배일상 · 김현수 · 이원영 · 노영광 · 윤중섭 · 정권 · 엄석원 · 채영주

Properties of Phytoncide Concentration at the Green Spaces in the Seoul Metropolis

Atmospheric Environment Team

**Je-seung Lee, Il-sang Bae, Hyun-soo Kim, Won-young Lee,
Young-kwang No, Joong-seop Yoon, Kweon Jung,
Seok-won Eom and Young-zoo Chae**

Abstract

This study assesses the phytoncide concentration in coniferous forests in the Seoul metropolitan area as measured from March to December, 2011. The concentrations of phytoncide in the ambient air of coniferous forests were considerably high compared to the concentrations in large natural recreational areas in other provinces. Among the types of sites, medium or small scale mountains represented the highest concentrations, followed by large scale mountains and residential green spaces. Five monoterpene components were detected in the order of α -pinene > β -pinene > camphene > d-limonene > cymene, and pinene was the major component measured, at rates up to 70% of the total concentration. The period of highest concentration was May to August, and the summer season showed higher levels than other seasons. Monthly concentrations variation seemed to correlate well with ambient temperature. But in diurnal fluctuation, nighttime concentrations were higher than in the daytime due to several factors other than ambient temperature.

Key words : Phytoncide, Monoterpene, Type of site, Coniferous forest, Temperature

서론

피톤치드란 식물에서 발생하는 자연성 휘발성

유기화합물(BVOC, Biogenic volatile organic compounds)로서, 식물이 만들어내는 정유(essential oil)를 포함한 테르펜(terpene) 물질

과 살균작용을 하는 화합물을 총칭하여 일컫는다 (1). 특히, 침엽수에서 추출한 정유 성분은 혈중 콜레스테롤의 저하, 진정효과, 항균, 살충효과 등 많은 약리작용이 보고되어 있으며, 이들 물질의 대부분은 이소프렌 단위체 두 개가 중합된 형태인 모노테르펜(monoterpene)인 것으로 알려져 있다 (2). 숲속에서 삼림욕을 즐기는 것은 수목에서 배출되는 피톤치드 성분을 마시는 것이라고 할 수 있으며, 시민들의 건강한 삶에 대한 관심이 증가 하면서, 최근 피톤치드에 대한 관심도 함께 증가하고 있다.

이러한 추세를 반영하여 대형 자연휴양림이 있는 지방을 중심으로 피톤치드 농도 조사가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 서울시와 같이 대도시의 녹지공간을 대상으로 한 연구는 부족한 실정이다. 특히, 서울시는 고밀도로 발달한 대도시임에도 불구하고, 중소규모의 산들과 공원녹지가 풍부한 특징이 있으며, 지방의 자연휴양림과 비교할 때, 접근성이 매우 양호하여 수시로 이용할 수 있다는 장점이 있다.

따라서, 이런 공간에서 피톤치드 농도를 조사하여 홍보하는 것은 시민들로 하여금 등산, 트레킹 등 건강한 여가생활을 유도할 수 있는 강력한 동기부여가 될 수 있으며, 이를 통해 시민 건강증진에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 서울시에 위치한 대형산, 중소규모산 그리고 생활권 녹지 등 다양한 유형의 도시 녹지공간의 공기에서 모노테르펜을 중심으로 피톤치드 농도를 조사하였으며, 이의 변동패턴 및 검출되는 주요 성분들에 대해 고찰하였다.

연구방법

1. 조사지역 및 시료채취

조사지역은 그림 1과 같이 서울시에 위치한 11개 지역의 녹지공간을 대상으로 하였다. 대상 지역은 대형산, 중소규모산, 생활권 녹지로 분류하였으며, 대형산으로는 도봉산, 관악산, 중소규모산에는 남산, 아차산, 신정산, 서울대공원 삼림욕장, 대모산, 인왕산, 그리고 생활권 녹지로는 양재 시

민의 숲, 서울 숲, 북한산 둘레길을 선정하였다. 각 조사지역별로 2~4개소의 시료채취 지점을 선정해서 시료를 채취하였으며, 이들 지점에는 피톤치드를 많이 발생하는 침엽수림과 함께 활엽수가 우세한 지점도 포함하였다.

또한 각 지역 시료채취지점은 등산로, 약수터, 체육공원 등 사람들의 통행이 많거나 휴식하는 공간으로, 실제로 호흡하는 공기 중의 피톤치드 농도가 측정되도록 하였다. 각 지역별 측정지점의 특징을 표 1에 요약하였다. 본 논문에서 언급하는 지역(site)은 이들 11개 지역을 의미하고, 지점(point)은 이들 지역 내 시료채취 지점을 의미한다.

시료채취는 2011년 3월부터 12월에 걸쳐 지역별 월 1회 실시하였고, 가급적 오전 10시에서 오후 4시 사이에 채취하였다. 채취방법은 고체흡착관법을 이용하였고, Tenax TA와 Carbograph가 이상(two bed)으로 충전된 흡착튜브를 미니펌프(SIBTA Σ 30, Japan)에 연결하여, 분당 250 mL로 40분동안 채취하여 총 10 L의 공기를 흡입하였다. 시료채취 전 흡착튜브를 분당 50 mL 정도의 질소가스가 흐르는 상태로 320°C에서 2시간 동안 세척한 후 swagelok fitting으로 밀봉하였다. 시료채취 후 흡착관을 다시 swagelok fitting으로 밀봉하고, 파라필름으로 싸서 분석 전까지 4°C로 냉장 보관하였다. 기기분석은 시료채취 날짜에 따라 최대 2주내에 분석을 완료하였다.

2. 분석항목 및 방법

분석대상물질은 피톤치드 물질 중 α -pinene, β

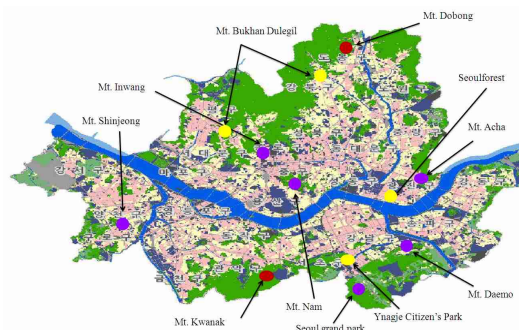


Fig. 1. The location of 11 sampling sites in this study.

Table 1. Major tree species around the sampling points in 11 sampling site

Site	Sample point	Major tree species	Site	Sample point	Major tree species
Mt. Dobong	DB_1	broadleaf	Mt. Shinjung	SJ_1	pine
	DB_2	broadleaf		SJ_2	broadleaf
	DB_3	pine			
	DB_4	pine			
Mt. Kwnank	KA_1	pine	Seoul grand park	SD_1	pine
	KA_2	broadleaf		SD_2	broadleaf
	KA_3	pine		SD_3	pitch pine
Mt. Nam	NM_1	pine	Mt. Bukhan Dulegil	BH_1	pine
	NM_2	pine+broadleaf		BH_2	pine
	NM_3	pine+broadleaf		BH_3	pine
Mt. Inwang	IW_1	broadleaf	Seoul forest	SF_1	nut pine
	IW_2	pine+broadleaf		SF_2	pine
	IW_3	pine+broadleaf		SF_3	broadleaf
Mt. Acha	AC_1	pine	Yangjae Citizen' forest	YJ_1	nut pine
	AC_2	pine		YJ_2	Metasequoia
	AC_3	pine		YJ_3	nut pine
	AC_4	pine+broadleaf			
Mt. Daemo	DM_1	pitch pine			
	DM_2	nut pine			
	DM_3	broadleaf			

-pinene, camphene, β -myrcene, 3-carene, γ -terpinene, d-limonene, p-cymene, α -phellandrene 등 모노테르펜 9종이었다. 사용된 표준품의 순도는 95% 이상(3-carene 90%, α -phellandrene 60%) 이었고, 메탄올(99.9%)로 희석하여 대략 1 mg/L로 제조한 후 10 μ l 마이크로시린지를 이용, 흡착관에 질소가스를 분당 80mL를 흘려주면서 단계적으로 주입하였다.

기기분석은 열탈착 장치(Markes, Ultra TD)가 부착된 GC(Agilent 6890)/MSD(Agilent 5975B)를 이용하였다. 흡착관의 열탈착 시 300°C에서 10분간 He가스를 농축트랩(25°C)으로 흘려주었으며, 열탈착 장치의 전체 He압력은 약 35 psi를 유지하였다.

농축트랩(trap) 탈착은 300°C에서 3분간 실시

하였고, 탈착 후 10 mL/min으로 유량분할을 실시하여 GC 컬럼(DB-1컬럼, 길이 60 m \times 내경 0.32 mm \times 필름두께 1.0 μ m)으로 약 1.3 mL/min의 유량이 흐르게 하였다. GC 오븐의 온도상승은 50°C에서 5분 대기 후 분당 6°C로 200°C까지 승온한 다음, 3분 후에 250°C로 승온하여 10분간 유지하였다. 질량검출기(MSD)는 EI 방식(70 eV)이며, 내부온도는 이온원에서 230°C, 사중극자(quadrupole) 내에서 150°C로 하였다.

3. 정도관리

시료채취에 이용된 흡착튜브와 시료채취 및 시료 운반 과정의 오염 확인을 위해 공시료(blank tube) 및 현장 공시료(field blank) 분석을 하였으며, 오염이

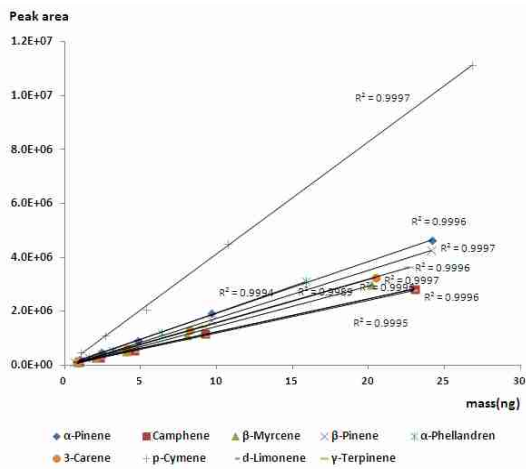


Fig. 2. Calibration curves of 9 monoterpene compounds analysed in this study.

없음을 확인하였다. 시료채취 펌프는 외부 교정기관에서 교정이 된 것을 사용하였고, 수시로 디지털 버블유량측정계(SIBATA, BF-05)를 이용하여 측정유량의 정확성을 유지하였다. 시료채취량이 10 L 정도로 많아 현장에서 시료의 파과(breakthrough) 유무를 알아보기 위해 두 개의 흡착관을 직렬로 연결하여 시료채취를 실시하였다. 그 결과 후단에서 검출되는 피톤치드의 양이 전단에 비해 5% 미만으로 검출되었으며, 파과 되는 양을 결과에 보정하지는 않았다. 정량한계(MDL)는 모든 물질이 0.05 ng (α -pinene)~0.12 ng (β -myrcene)의 범위로 나타났으며, 검량선의 결정계수(r^2)도 모든 물질에서 0.999 이상으로 양호하게 나타났다(그림 2).

결과 및 고찰

1. 지역별 조사결과

서울시 11개 지역의 3월에서 12월간 피톤치드 조사결과는 표 2와 같다. 우선 7월과 9월은 기상조건이 맞지 않은 관계로 시료채취를 못한 지역들이 있고, 인왕산의 경우 입산통제로 인해 8월 이후 조사를 실시하지 못하여, 통계처리 시 시료채취 지점의 일치가 필요한 경우 이들 자료는 제외하였음을 밝힌다. 전체적으로 볼 때, 피톤치드는

이번 조사 기간 중 5월에서 8월까지가 다량 발생하는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 식물의 피톤치드 방출에 영향을 미치는 인자 중 온도 및 일사강도가 가장 중요한 요인이기 때문이다. 도심 공원인 서울숲을 제외한 모든 지점에서 500 pptv가 넘는 피톤치드가 검출된 지점이 있었으며, 최고값은 북한산 둘레길에서 889.9 pptv로 측정되었다. 박 등(3)은 충청북도의 5개 자연휴양림에서 142.8~887.4 pptv, 공 등(4)은 경상남도의 5개 자연휴양림에서 139.3~964.4 pptv(덕유산 조사자료 제외)의 모노테르펜 농도를 보고하였다. 지방의 대형 자연휴양림에서의 조사결과와 비교하였을 때, 본 연구에서와 같이 대도시의 소규모로 우거진 침엽수림에서도 상당한 수준의 피톤치드가 존재함을 알 수 있다.

그러나, 표 3에서 보는 바와 같이 다량의 피톤치드가 발생하는 기간 중에도 같은 시료채취 지점에서의 농도 편차가 심하게 나타나고 있었다. 표 3는 각 지역별로 침엽수가 가장 많은 한 지점의 농도를 정리한 것인데, 5~8월 기간 중 최대값과 최소값의 비가 1.3(남산)~18.4(북한산둘레길)로 나타나고 있고, 평균적으로 4.8 배 정도로 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이는 시료채취 시간이 짧음으로 인해 채취시간 동안의 기상적 요인의 차이가 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 특히, 서울지역의 경우 침엽수림이 광범위하게 우거진 대형 자연휴양림과 달리 침엽수림이 소규모이고, 이로 인해 바람의 세기와 방향 등 국지적인 기상 영향을 많이 받을 수 있을 것이다. 이런 의미에서 각 지점의 최고 농도는 기상조건에 따라 도달 가능한 농도 수준으로 해석할 수 있으며, 오히려 평균값에 비해 조사 지점의 피톤치드 농도 수준을 잘 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 지역 유형(대형산, 중소규모산, 생활권녹지)별 농도

본 연구에서는 산의 규모와 녹지의 성격에 따라 조사 대상지역을 대형산, 중소규모산, 생활권 녹지의 3개 유형으로 분류하였다. 유형별 조사결과는 그림 3과 같이 중소규모산에서 가장 높게 나타났고, 대형산, 생활권 녹지의 순으로 나타났다. 중소규모산의

Table 2. Monthly concentration of every sample point in study period(unit : pptv)

site	sample point	Month									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mt. Dobong	DB_1	12.4	37.4	25.0	118.7	-	108.7	-	94.0	28.1	21.1
	DB_2	n.d.	27.7	19.8	112.0	-	31.7	-	27.4	35.4	1.8
	DB_3	7.8	96.5	117.7	110.7	-	159.2	-	53.5	39.5	7.6
	DB_4	3.5	76.6	307.0	106.6	-	533.0	-	316.3	233.6	18.8
Mt. Kwnank	KA_1	44.2	26.1	394.3	467.1	701.8	358.3	170.4	116.0	33.3	21.0
	KA_2	7.6	13.6	62.3	43.3	58.7	44.4	29.5	47.9	31.8	1.8
	KA_3	11.0	20.0	262.9	220.7	198.8	86.8	56.4	78.4	14.9	21.0
Mt. Nam	NM_1	129.4	517.2	606.0	767.6	-	616.8	-	203.5	42.4	2.8
	NM_2	15.5	369.1	279.0	236.6	-	208.1	-	80.8	15.2	6.0
	NM_3	6.6	48.2	120.9	204.4	-	79.8	-	1626.7	75.2	n.d.
Mt. Inwang	IW_1	n.d.	62.0	161.7	106.1	207.7					
	IW_2	2.3	71.6	192.2	186.8	178.6			-		
	IW_3	11.8	70.8	511.4	377.9	113.9					
Mt. Acha	AC_1	10.7	121.4	196.0	274.8	214.2	300.1	118.2	140.3	56.1	79.7
	AC_2	7.4	145.6	119.7	302.2	152.4	240.3	77.0	92.3	64.2	64.9
	AC_3	43.3	217.7	269.2	639.8	297.7	382.4	154.5	266.4	58.5	63.2
	AC_4	37.6	90.5	60.9	194.0	214.6	130.3	105.4	54.0	46.1	42.2
Mt. Daemo	DM_1	18.9	104.6	117.3	159.9	459.9	454.5	78.5	137.0	61.2	8.6
	DM_2	12.1	144.2	145.8	184.8	412.1	680.7	40.8	285.2	53.7	1.7
	DM_3	n.d.	25.8	53.9	91.0	95.1	80.7	17.2	25.0	31.4	14.2
Mt. Shinjung	SJ_1	89.1	40.0	253.6	568.1	-	334.4	-	221.9	104.6	n.d.
	SJ_2	16.0	4.2	52.7	38.6	-	19.7	-	17.8	61.1	n.d.
Seoul grand park	SD_1	n.d.	104.6	709.2	260.4	551.1	597.6	-	187.3	30.6	8.4
	SD_2	16.9	7.4	122.5	81.8	78.4	53.1	-	24.3	14.6	2.0
	SD_3	51.2	30.5	237.6	422.5	639.8	241.3	-	228.1	30.8	13.9
Mt. Bukhan Dulegil	BH_1	20.9	210.1	138.7	66.9	620.9	228.6	-	34.6	77.4	12.4
	BH_2	3.7	687.1	537.0	889.8	146.6	48.2	-	23.0	15.7	3.8
	BH_3	n.d.	95.8	129.7	308.8	317.9	685.2	-	77.6	13.4	16.9
Seoul forest	SF_1	4.7	214.6	80.4	155.6	-	217.8	-	19.2	44.8	9.6
	SF_2	n.d.	44.6	53.3	186.6	-	159.8	-	42.0	60.5	n.d.
	SF_3	n.d.	38.1	8.0	28.8	-	-	-	4.6	57.0	n.d.
Yangjae Citizen' park	YJ_1	22.4	118.1	281.0	188.9	815.2	112.7	99.5	331.7	94.1	53.6
	YJ_2	251.4	68.9	379.3	66.9	306.0	23.7	24.6	72.9	69.6	26.5
	YJ_3	23.7	85.6	137.7	107.6	744.4	82.2	130.6	305.0	61.2	79.2

(note) 1. The data(1626.7 pptv) of October at NM_3 in Mt. Nam was excluded in data processing because sample was taken during pine trees were pruning.

2. n.d. : not detected

Table 3. Summary of concentration fluctuation at one sampling point showing maximum concentration in each site

unit : pptv	Max. ~ Min.	Ave. ± S.D.
Mt. Dobong	533.0 ~ 106.6	315.5 ± 213.3
Mt. Kwnank	701.8 ~ 358.3	480.4 ± 154.4
Mt. Nam	767.6 ~ 606.0	663.5 ± 90.4
Mt. Acha	639.8 ~ 269.2	397.3 ± 168.7
Mt. Daemo	459.9 ~ 117.3	297.9 ± 184.8
Mt. Shinjung	568.1 ~ 253.6	385.4 ± 163.3
Seoul grand park	709.2 ~ 260.4	529.6 ± 191.3
Mt. Bukhan Dulegil	889.8 ~ 48.2	405.4 ± 385.8
Seoul forest	217.8 ~ 80.4	151.3 ± 68.8
Yangjae Citizen' park	815.2 ~ 112.7	349.4 ± 318.0

경우 침엽수림이 규모는 작지만 밀집된 경우가 많고, 남산의 NM_1(남측소나무 탐방로)을 제외하고는 나무의 수고가 낮아 피톤치드 농도가 높은 것으로 판단된다. 대형산으로 분류한 도봉산과 관악산은 다소 낮게 측정되었는데, 이들 지역의 조사지점에서 침엽수의 밀집도가 낮은 것과 관련이 있는 것으로 보인다. 그러나 관악산 KA_1의 경우, 서울대학교 내에서 관악산 등산로 입구지점인데, 이 지점은 다른 중소규모산과 같이 수고가 낮은 소나무들이 밀집되어 있어 피톤치드 농도가 높게 측정된 것으로 보인다.

한편, 대형산의 경우 등산로가 워낙 다양하고 산의 규모가 상대적으로 커서 조사대상 지점이 이

들 지역의 침엽수림을 충분히 대표할 수 없을 것이며, 침엽수림이 우거져 있더라도 등산로가 좁고 험한 관계로 시료채취를 할 수 없는 지점도 다수 존재하였다. 따라서 대형산의 농도가 중소규모의 산에 비해 낮다고 일반화하는 것은 힘들 것으로 판단된다. 생활권 녹지의 조사결과는 북한산 둘레길, 양재 시민의 숲, 서울 숲의 순으로 나타났으며, 이들 세 지역의 특징을 잘 설명하고 있다. 북한산 둘레길의 경우 북한산 자락으로 소나무숲이 잘 우거진 곳들이 있으며, 양재 시민의 숲은 주로 잣나무가 밀집된 공간으로 조성이 되어 있다. 서울 숲의 경우 전체 지역에서 가장 낮게 조사되었는데, 이 지역은 침엽수림이 다른 지역에 가장 적고, 밀집되지 않았다. 이들 생활권 녹지 지역들의 경우 농도의 편차가 매우 심한 특징이 있다. 전체 조사지점에서 800 pptv가 넘게 조사된 두 개 지점이 모두 생활권 녹지 유형에 포함되었다. 즉, 산에 위치하지 않은 지점이더라도 기상조건에 따라 좁은 지점에서 풍부한 피톤치드가 존재할 수 있는 반면, 주로 평지의 좁은 공간에 조성된 침엽수림인 관계로 방출된 피톤치드의 확산이 용이하고, 다른 지역에서 유입이 없기 때문에 농도편차가 큰 것으로 판단된다.

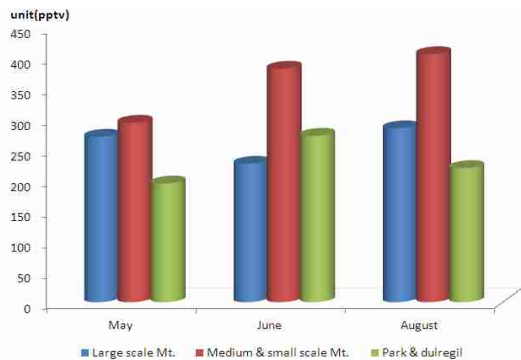


Fig. 3. Comparison of phytoncide concentration with respect to the type of sites in this study.

3. 검출되는 주요 성분들

검출된 피톤치드 성분은 대략 5개 성분으로 α

-pinene > β -pinene > camphene > d-limonene > p-cymene 의 순서이었고, β -myrcene, 3-carene, γ -terpinene, α -phellandrene 은 극미량 또는 검출되지 않았다. 조사대상 지점의 침엽수의 종류는 소나무, 잣나무, 리기다소나무이었고, 활엽수 지점을 제외한 23개 지점에서 소나무림 17지점, 잣나무림 4지점, 리기다소나무림 2지점으로 압도적으로 소나무림이 많았다. 그림 4는 우점하는 수종에 따라 조사지점을 분류하였을 경우의 지점별 피톤치드 성분비율을 나타내고 있다. 소나무림과 리기다소나무림의 성분비는 거의 유사하였고, 잣나무림에서는 camphene 의 비율이 다소 높게 나타났으나, 우점 수종별로 피톤치드 성분의 구성이 확연하게 차이나는지는 않았다. 모든 지역에서 α -pinene 함량이 월등하게 많았으며, 검출되는 성분 중 pinene 성분이 70% 이상으로 대부분을 차지하였다. 지 등(5)은 enclosure chamber를 통한 배출특성 연구를 통해 소나무와 잣나무에서 주로 배출되는 물질이 α -pinene 과 β -pinene 이고, 소나무의 경우 구성비가 α -pinene> β -pinene>camphene>d-limonene, 잣나무의 경우, α -pinene> β -pinene>d-limonene>camphene으로 camphene과 d-limonene이 두 나무의 배출특성 차이에 주요한 역할을 하는 것으로 파악하였다. 공기 중 모노테르펜이 대상인 본 연구에서도 주로 배출되는 물질은 α -pinene 과 β -pinene 이었지만, camphene 과 d-limonene의 특징은 나타나지 않았고, 오히려

잣나무가 많은 지점에서 camphene 의 성분비가 더 높게 나타났다. 김 등(6)은 소나무로부터 배출되는 모노테르펜의 구성비를 수령별로 파악하였으며, 이 경우에도 enclosure chamber를 이용하였는데, 수령이 증가할수록 α -pinene의 구성비가 증가하고, β -pinene 은 감소하는 것으로 보고하였다. 또한 이 연구에서는 myrcene과 β -phellandrene 의 함량이 22년생의 소나무의 경우 각각 19.8%와 37.4%로 상당히 높게 나타났다. 국내 자연휴양림 공기에서의 조사결과에서는 분석대상 물질의 종류와 수에 있어 다소의 차이가 있으나, 주로 나타나는 성분과 구성이 유사한 것으로 파악된다. 다만, 충북 민주지산의 경우 낙엽송이 조성된 지역으로서 sabinene이 36.7%로 가장 높은 구성비를 보였고(3), 덕유산 잣나무 식생대에서는 camphene이 46%를 차지하는 것으로 보고된 바 있다(4). 이상으로부터, enclosure chamber를 통해 수목으로부터 배출된 직후의 모노테르펜의 구성비와 배출되어 어느 정도 확산이 이루어진 후의 공기 중 구성비는 다소 차이가 있는 것으로 판단된다.

4. 월별 변동특성

조사대상 지역의 월별 피톤치드 농도의 변화는 그림 5와 같다. 그림 5에서 보는 바와 같이 월별로 피톤치드 농도의 증가과 감소경향이 뚜렷하였고, 피톤치드가 풍부하게 검출되는 기간은 5월에서 8월까지인 것으로 조사되었다. 7월과 9월의 조사결과와는 장마 등 기상조건으로 시료채취가 이루어지지 않은 지역이 있어 제외하였지만, 그림 5에서 보는 바와 같이, 여름철에 가장 높은 농도를 보이는 것은 뚜렷이 확인할 수 있었다. 10월 이후 농도는 급격히 감소하였고, 겨울에는 극미량 또는 불검출되는 지점이 다수 있었다. 계절별 자연휴양림 공기 중 피톤치드 농도는 박 등(3)의 연구에서 여름>봄>가을의 순으로, 공 등(4)의 연구에서는 봄>여름>가을의 순으로 조사되었다. Lim 등(7)은 국내 두 지역에서의 계절별 소나무의 모노테르펜 배출속도(ERs)가 한 지역에서는 봄철에 1.612 ($\mu\text{gC/gdw/hr}$)로 가장 높고, 다른 지역은 여름철에 1.704($\mu\text{gC/gdw/hr}$)로서 가장 높음을 확인하였다. 또한 Holzke 등(8)은 적송(scots pine)으

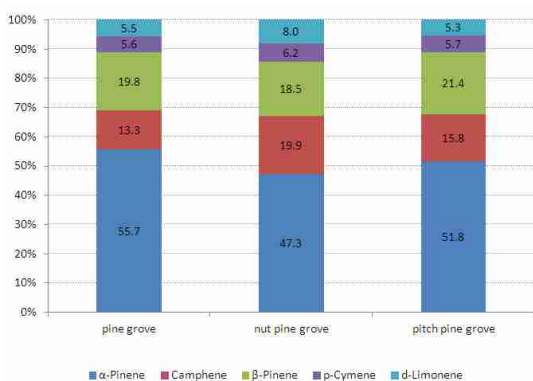


Fig. 4. Percentile of phytoncide component in ambient air according to the tree species at sampling point.

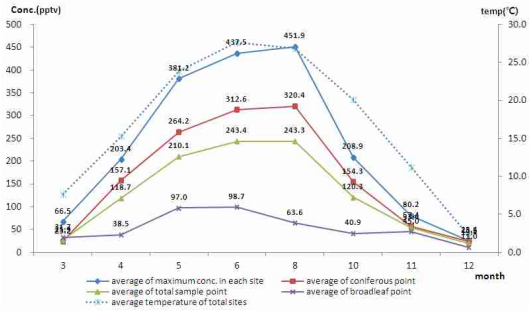


Fig. 5. Monthly variations of average phytoncide concentrations.

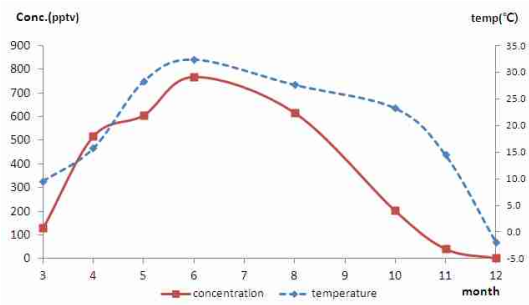


Fig. 6. Comparison of monthly ambient monoterpene concentration and temperature at NM_1 point in Mt. Nam pine tree forest.

로 부터의 모노테르펜 방출속도가 봄부터 증가하여 여름(6월)에 최고치에 도달한 후 가을에 최저값을 나타내는 것으로 보고하였다. 이러한 결과들은 본 연구와 대체로 일치하는 것으로 나타났다.

표 4는 남산지역 NM_1지점에서의 주요 모노테르펜들 및 기상인자와의 상관성을 나타낸 것이다. NM_1지점은 남산 소나무탐방로로서 소나무림이 타지점에 비해 넓어 국지적인 바람의 영향을 덜 받는 지역이라 할 수 있다. 검출되는 모노테르펜들 간의 상관성은 대체로 양호하였으며 ($0.694 < r^2 < 0.960$), 온도와 검출농도의 r^2 는 0.678 정도로 나타났고, 습도와는 0.259로 낮게 나타났다. 온도는 모노테르펜의 방출과 가장 관련이 깊은 것으로 알려져 있는데, Lim *et al.*의 연구에서 배출속도

(ERs)의 계절별 온도와의 상관성에 있어 봄철에 r^2 가 0.803으로 양호하였으나, 가을과 겨울에는 각각 0.386과 0.248로 낮게 나타난 바 있다. 이러한 원인으로 계절에 따른 나무의 상태변화, 수령, 습도, 나무표면 습기 등 온도 이외의 이차적인 배출 제어요인이 관련될 수 있음을 언급하였다. 본 연구에서는 동일 지점에서 계절별로 이러한 상관성을 확인하기에는 계절별 시료수가 너무 적은 한계가 있었다. 그러나, 계절별 온도 경향과 모노테르펜 농도 경향 사이의 차이는 확인할 수 있었다. 그림 5의 모노테르펜 농도와 온도 경향을 보면, 8월 이전과 이후에 농도선과 온도선의 간격이 더 커짐을 볼 수 있다. 이런 경향은 소나무림이 잘 우거진 NM_1지점에서 더 잘 파악할 수 있다(그림 6). 10

Table 4. Correlation between monoterpene and meteorological factors at NM_1 sampling point throughout study period

	Temp.	R.H.	α -P	Cam	β -P	p-C	d-L	Tot
Temp.	1.000							
R.H.	0.178	1.000						
α -P	0.666	0.326	1.000					
Cam	0.673	0.139	0.773	1.000				
β -P	0.508	0.219	0.907	0.843	1.000			
p-C	0.714	0.140	0.786	0.939	0.772	1.000		
d-L	0.616	0.069	0.694	0.951	0.767	0.960	1.000	
Tot	0.678	0.259	0.973	0.889	0.951	0.878	0.823	1.000

(Abbreviations)

Temp.: temperature, R.H.: relative humidity, α -P: α -pinene, Cam: camphene, β -P: β -pinene, p-C: p-cymene, d-L: d-limonene, Tot: total concentration

월의 온도는 4월에 비해 높지만 모노테르펜 농도는 절반도 되지 않게 검출되었고, 11월은 4월과 온도는 비슷하데 검출된 농도는 10배 이상 적었다. 즉, 농도선과 온도선의 간격이 일정하지 않고 차이가 많이 나는 것은 온도 외에 계절별로 다른 요인이 모노테르펜의 방출에 영향을 미치고 있음을 의미한다. Holzke 등은 모노테르펜 배출능(emission potential)이 계절별로 차이가 있어, 온도가 비슷하더라도 계절에 따라 모노테르펜 배출속도가 차이가 나는 것을 보고하였다. 이 연구에서는 α -pinene의 배출속도가 봄철에 비해 온도가 비슷한 늦여름에 10배 정도 작아지는 것으로 나타났는데, 이러한 현상을 온도 외에 terpene synthases의 활성화와 같은 내부적인 요인이 배출속도에 영향을 미치는 것으로 파악하였다. 결과적으로 이러한 계절별 배출속도 차이와 관련한 현상이 본 연구에서와 같이 침엽수림 공기 중 모노테르펜 농도와 대기 온도와의 경향에 잘 반영되는 것으로 나타났다.

5. 일중 변동특성

모노테르펜 농도의 일중 변동을 파악하기 위해 2011년 9월에 아차산 AC_1 지점에서 시료를 채취하였다. 시간 간격은 2시간이었으며, 시료채취기간 중 바람은 약하거나 거의 무풍상태이었다. 그림 7에서 보는 바와 같이 시간대별로 변동성이 크게 나타났으며, 오후 5시 이후부터 오전 1시 사이에 높은 농도를 보이고 있다. 오전 3시와 5시에 다소

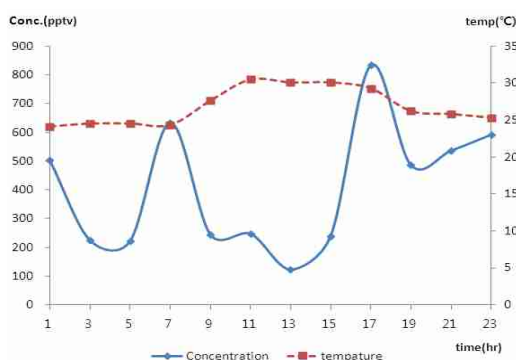


Fig. 7. Diurnal variation of phytoncide concentration at Mt. Acha in September.

낮게 측정되었다가 오전 7시에 다시 높아졌는데, 시료채취 당시의 일시적인 바람의 영향으로 판단된다. 그리고, 오전 9시에서 오후 3시 사이의 주간 시간대에서 피톤치드가 가장 낮은 농도로 조사되었다. 국내 자연휴양림 공기 중 모노테르펜의 일중 변화는 박 등(3)의 연구에서 오전 8~10시 사이에 가장 높은 농도로 측정되었고, 한라산에서 측정한 이(8)의 연구에서는 낮 동안 농도가 낮고 야간에 높게 조사되는 등 상반된 결과를 보이고 있다.

Harrison 등(9)의 연구에서도 주간보다 야간의 모노테르펜 농도의 증가가 명확하게 나타나고 있으며, 이는 야간에도 모노테르펜이 방출되기 때문으로 파악하였다. 이것은 Geron 등(10)이 언급한 바와 같이 모노테르펜의 배출이 온도 만에 의존하기 때문에 야간에도 적지만 지속적인 배출이 이루어짐을 의미한다. Harrison 등은 이소프렌과 모노테르펜의 배출속도(ERs)와 대기 중에서의 농도를 조사하였는데, 두 물질 모두 배출속도에 있어서도 주간에 피크치를 나타내어 비슷한 양상이었지만, 빛이 없는 야간에는 이소프렌과 달리 모노테르펜의 배출은 영으로 떨어지지 않았다. 반면, 야간에는 OH, O₃ 등 모노테르펜을 대기에서 제거하는 물질들이 거의 사라지고, 대기 혼합고가 낮아지기 때문에, 대기 중 모노테르펜이 주간에 비해 야간에 더 높은 농도를 보인다고 보고하였다. Laffineur 등(11)은 이소프렌과 모노테르펜의 플럭스(flux)를 조사하여, 야간에 모노테르펜의 플럭스가 $0.093 \pm 0.019 \mu\text{g m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 정도가 됨을 제시하였다. 또한 이 논문에서는 다양한 문헌고찰을 통해 야간에 관찰되는 모노테르펜 플럭스의 가능한 이유를 제시하고 있는데, 우선 주간에 생성된 모노테르펜이 나무의 조직(tissue)에 저장되었다가 밤에 서서히 방출될 수 있으며, 다양한 기구를 통해 토양으로부터 배출될 수도 있는 것으로 파악하였다.

결론

2011년도 3월에서 12월까지 시민들이 자주 이용하는 서울시 11개 녹지지역의 침엽수림 공기 중

피톤치드 농도를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대도시임에도 불구하고 침엽수가 우거진 녹지 공간에서 지방의 대형 자연휴양림 수준의 피톤치드가 검출되었다. 그러나, 서울 지역의 경우 침엽수림이 소규모인 관계로 국지적인 기상 요인으로 변동폭이 매우 큰 것으로 조사되었다.
2. 지역 유형별 피톤치드 농도는 중소규모산 > 대형산 > 생활권 녹지의 순서였으며, 중소규모산의 경우 침엽수림이 밀집된 경우가 많아 상대적으로 농도가 높은 것으로 판단된다.
3. 검출된 성분은 대략 5개 성분으로 α -Pinene > β -Pinene > Camphene > d-Limonene > Cymene의 순서였으며, 소나무림, 잣나무림 그리고 리기다소나무림의 피톤치드 성분구성은 유사하였다. 또한 전체 피톤치드 농도 중 pinene 성분이 70% 이상으로 대부분을 차지하였다.
4. 월별 조사결과, 피톤치드가 다량 발생하는 기간은 5월에서 8월까지인 것으로 조사되었고, 여름철(8월)이 가장 높은 농도를 보였다. 그리고, 10월 이후 농도는 급격히 감소하였고, 겨울에는 극미량 또는 불검출 되는 지점이 다수 있었다.
5. 월별 동일 지점에 대한 주간의 피톤치드 농도는 대기 온도와 상관성이 높은 것으로 나타났으나 ($r = 0.678$), 동일 지점의 일중 변동에 있어서는 온도가 높은 주간에 비해 온도가 낮은 야간에 더 높은 농도를 나타내었다.

참고문헌

1. 김영용 : 삼림의 피톤치드와 건강. 제주교육대학교 논문집, 제35집, p281~303, 2006.
2. 양재경, 강병국, 김태홍, 홍성철, 서원택, 최명석 : 침엽수 잎으로부터 효율적인 정유 추출법 탐색 및 정유성분 분석. 한국생물공학회지, 17(4):357~364, 2002.
3. 박덕규, 신필식, 전병진, 김창영, 권오근, 석태광 : 도내 자연휴양림 피톤치드 분포 특성. 충청북도보건환경연구원보, 19:87~115, 2010.

4. 공남식, 최형섭, 변종환, 박점상, 이호열 : 자연휴양림 피톤치드(phytoncide) 발생특성 연구. 경상남도보건환경연구원보, 11:15~169, 2010.
5. 지동영, 김소영, 한진석 : 소나무와 잣나무에서 배출되는 주요 테르펜의 배출특성에 관한 비교 연구. 한국대기환경학회지, 18(6):515~525, 2002.
6. Lim JH, Kim JC, Kim KJ, Son YS, Sunwoo Y and Han JS : Seasonal variations of monoterpene emissions from *Pinus densiflora* in East Asia. Chemosphere, 73:470~478, 2008.
7. Holzke C, Hoffmann T, Jaeger L, Koppmann R and Zimmer W : Diurnal and seasonal variation of monoterpene and sesquiterpene emission from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Atmospheric Environment, 40:3174~3185, 2006.
8. 이해영 : 제주도 산림 대기 내 monoterpene의 분포특성. 제주대학교, p45~50, 2008.
9. Harrison D, Hunter MC, Lewis AC, Seakins PW, Bonsang B, Gros V, Kanakidou M, Touaty M, Kavouras I, Mihalopoulos N, Stephanou E, Alves C, Nunes T and Pio C : Ambient isoprene and monoterpene concentrations in a Greek fir (*Abies Borisii-regis*) forest. Reconciliation with emissions measurements and effects on measured OH concentrations. Atmospheric Environment, 35:4699~4711, 2001.
10. Geron C, Rasmussen R, Arnsts RR and Guenther A : A review and synthesis of monoterpene speciation. Atmospheric Environment, 34:1761~1781, 2000.
11. Laffineur Q, Aubinet M, Schoon N, Amelynck C, Muller JF, Dewulf J, Van Langenhove H, Steppe K, Simpraga M and Heinesch B : Isoprene and monoterpene emissions from a mixed temperate forest. Atmospheric Environment, 45:3157~3168, 2011.