

낙엽송으로부터 배출되는 자연 VOC 배출속도 및 배출특성 연구

김기준·김조천·임준호*·선우영·박현주·조규탁**
건국대학교 환경공학과, *국립환경연구원 실내환경과, **한국환경기술진흥원
(2006년 4월 26일 접수; 2006년 11월 8일 채택)

Study on Natural VOC Emission Rates and Characteristics Emitted from *Larix Leptoleis* (Sieb. et Zucc.) Gordon

Ki-Joon Kim, Jo-Chun Kim, Jun-Ho Lim*, Young Sunwoo,
Hyun-Ju Park and Kyu-Tak Cho**

Department of Environmental Engineering, Konkuk University Seoul, 143-701, Korea

*Indoor Air Quality Division, National Institute of Environmental Research

**Korea Institute of Environmental Science and Technology

(Manuscript received 26 April, 2006; accepted 8 November, 2006)

In order to investigate the compositions and the emission rates of monoterpenes emitted from coniferous trees, those from *Larix leptoleis* (Sieb. et Zucc.) Gordon were measured. In spring and summer, the major monoterpenes were α -terpinene, α -pinene, myrcene; however, α -pinene and α -terpinene were most abundant in fall. The total mean monoterpene emission rates were 0.455 ($\mu\text{gC/gdw/hr}$) during the whole period. The higher monoterpene emission rates were found in fall compared to those in spring and summer. In addition, the slopes (β value) between emission rate and temperature were two times lower in fall than those in spring and summer. It was also found that *Larix leptoleis* (Sieb. et Zucc.) Gordon had lower monoterpene emission rates than *P. densiflora* and *P. rigida*.

Key Words : NVOC, Monoterpene, ERs, β value, *Larix leptoleis* (Sieb. et Zucc.) Gordon

1. 서 론

환경대기중 휘발성유기화합물(VOCs)은 질소산화물 존재 시 태양광이 관여하는 반응에 의해 O_3 , PAN 등의 광화학 생성물을 형성하는 오존 전구물질(Ozone precursor)로 알려져 있다¹⁾. VOCs의 배출은 크게 두 가지로 볼 때 인위적인 배출원과 식생과 같은 자연적인 배출원으로부터 이루어진다. 인위적인 VOCs의 배출특성과 그 양에 대한 자료는 몇 년 전부터 구체적으로 배출원별 실태 파악이 이루어지고 있다. 그러나 자연적 VOCs(Natural VOCs, NVOC)의 배출특성이나 배출량에 대한 측정 자료는 매우 부족한 실정이다. NVOC의 가장 주요한 배출원은 식물이라 할 수 있는데 이들로부터 배

출되는 이소프렌(isoprene)과 모노테르펜(monoterpene)은 NVOC의 상당부분을 차지한다^{2,3)}. NVOC가 대기화학에 있어서 매우 중요한 역할을 한다는 사실은 미국의 Went(1960)에 의해 처음 제기되었다⁴⁾. 그 이후 많은 연구결과들에 의하여 NVOC의 대기환경에 대한 영향(에어로졸 형성, 전지구적 대기화학반응, 광역적 광화학산화제의 형성, 탄소순환의 수지균형, 비도시지역의 산성침적에 기여하는 유기산의 생성)이 보고 되어 왔다^{5,6)}. 최근의 국내 연구 결과에서도 이러한 가능성이 제기되었는데, 소나무로부터 배출되는 모노테르펜 중에서 OH 라디칼과의 반응속도가 α -pinene 보다 3배 정도 큰 myrcene과 β -phellandrene의 구성비가 총 모노테르펜 양의 50% 이상 차지하는 것으로 확인되었다⁷⁾. 이러한 결과는 질소산화물(NO_x)의 농도가 높은 도시 대기 중에서 침엽수로부터 배출되는 모노테르펜이 광화학 스모그 발생에 영향을 미칠 수 있다는 것과 침엽수로부터 배출되는 NVOC의 배출량 자료

Corresponding Author : Jo-Chun Kim, Department of Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
Phone: +82-2-450-4009
E-mail: jckim@konkuk.ac.kr

와 함께 개개의 모노테르펜에 대한 배출특성을 파악하는 것 또한 중요하다. 이를 시사하는 것이다.

VOC성분들의 배출기여도는 식물의 종류와 외적 조건에 의해서 현저히 변화할 수 있으며, 태양빛의 강도와 온도에 의해서도 배출속도(emission rate)가 변화한다는 것은 많은 연구자들의 연구 결과에서 보고 되어 왔다⁸⁻¹¹⁾. 모노테르펜은 주로 침엽수림에서 배출되는데 수종별 차이를 제외하고도 온도, 빛, 습도 등의 많은 환경변수에 의해서 그 배출량은 영향을 받으며, 계절변화에 대하여도 영향을 받는 것으로 알려지고 있다¹²⁾.

본 연구의 목적은 국내 주요 침엽수들로부터 배출되는 NVOC의 배출특성과 배출속도를 연구하는 것이다. 구체적으로 본 연구에서는 낙엽송(*Larix leptoleis* (Sieb. et Zucc.) Gordon)을 대상으로 계절별로 배출되는 테르펜의 구성비 특성과 계절별 모노테르펜의 배출속도(emission rate)를 비교하고자 하였다. 또한, 낙엽송의 배출속도를 기준에 얻어진 소나무와 리기다소나무의 여름철 배출속도와 비교하였다.

2. 연구방법

2.1. 측정 지점 및 조건

낙엽송은 침엽수이면서도 가을에 낙엽이 떨어지는 특성을 가지고 있어 다른 침엽수와는 그 특성이 매우 다르다. 낙엽수로부터 배출되는 테르펜의 배출속도 측정 대상 지점은 중부지역인 충청북도 남한강유역의 월악산 국립공원 일대(N 36°49'16.7", E 128°05'19.8")이었고, 측정 기간은 2003년도 5월 14일부터 2003년 10월 4일 이었다. 각 계절별 측정 기간은 표 1과 같으며, 연간 총 측정회수(n)는 69회 이었다. 측정대상 낙엽송의 총 그루 수는 10그루 이었고, 각 그루당 2~4개의 가지를 대상으로 측정을 수행하였다. 낙엽송의 수령은 4령으로 32~37년생 범위이었고, 수고의 범위는 15~19m 이었다. 사용한 챔버 내의 온도(Environmental Temperature)는 봄철 21°C ~ 37°C, 여름철 19°C ~ 34°C 가을철 10°C ~ 30°C로 측정되었다.

2.2. 측정 및 분석

나무에서 발생하는 NVOC를 포집하기 위하여 주

로 사용되는 방법으로는 3 종류의 현장측정방법(Field method)과 한 부류의 실험실적 방법(laboratory method)이 알려져 있다. 현장측정방법에는 VET(Vegetation Enclosure Techniques), MMT (Micrometeorological Techniques), ATT(Atmospheric Tracer Techniques) 등의 기술이 있고, 실험실적방법에는 GEC(Gas Exchange Chamber)의 접근 방법이 있다¹³⁾. 본 연구에서 낙엽송으로부터 배출되는 모노테르펜의 배출속도 측정을 위하여 사용된 방법은 semi-static enclosures¹⁴⁾나 dynamic flow-through chamber¹⁵⁾와 같은 기존 방법을 보완하여 개발된 VEC(Vegetation Enclosure Chamber)가 사용되었다¹⁶⁾. VEC의 재질은 Tedlar 재질이 사용되었고, 부피는 19L 이었다. Zero air system (Model 701, API, USA)을 사용하여 zero air를 VEC에 공급하였고 동시에 유출구에서 흡입펌프(vacuum pump, N035.1.2AN.18, Neuberger, USA)를 사용하여 유입구와 동일한 유량으로 흡입시켜 VEC로의 유입유량과 유출유량이 항상 일정하도록 유지하였다¹⁷⁾. 이때 모든 유량은 MFC (Mass Flow Controller, 5850E, Brooks Instrument, USA)를 사용하여 조절하였다.

현장에서의 시료채취를 위하여 흡착트랩이 사용되었는데, 흡착트랩은 Tenax TA (60/80 mesh, SUPALO, USA)와 CarbotrapTM (20/40 mesh, SUPALO, USA)을 채운 트랩이 사용되었다^{18,19)}. 이때, 시료채취 유량은 150mL/min이었고, 채취된 시료들은 냉동고에 보관 후 48시간 이내에 분석되도록 하였다. 시료는 정성과 정량분석을 위하여 Aerotrap 6000(Aerotrap Desorber, Tekmar, Dohrmann, USA)과 GC/MSD(HP6890/ HP5973, USA) 시스템, Aerotrap 6000과 GC/FID(HP5890) 시스템이 각각 사용되었다²⁰⁾.

2.3. 시료채취 및 분석의 QA/QC

본 연구에서 사용된 흡착트랩의 모노테르펜에 대한 회수율은 94.7%(±4.5%)이었고, 상대표준편차(RSD)는 4.7% 이었다. 흡착트랩은 시료채취 전 3시간동안 280°C에서 conditioning을 수행하였으며, 사용 전에 trap blank test를 통하여 trap의 cleaning 상태를 확인하였다.

Table 1. Details of Coniferous Trees investigated

Species	Region	Season	Period (yy.mm.dd)	No. of samples (n)	Temperature (°C)
<i>Larix leptoleis</i>	Worak Mt.	Spring	03.05.14 ~ 03.07.17	23	21 ~ 37
		Summer	03.08.12 ~ 03.08.26	23	19 ~ 34
		Fall	03.09.30 ~ 03.10.04	23	10 ~ 30

본 연구에서 검량선을 작성하기 위하여 α -pinene, β -pinene, α -terpinene, d-limonene 등의 테르펜 표준용액(99%, Aldrich, USA)을 사용하였으며, 메탄올(99.999%, Aldrich, USA)에 희석시켜 흡착트랩에 주입(spiking)하였다. α -Pinene, β -pinene, α -terpinene, d-limonene 등의 여러 물질의 검량선을 작성한 결과 모든 물질의 결정계수(r^2) 값이 0.996 이상으로 나타났다. 모노테르펜에 대한 MDL (Method Detection Limit, 3 standard deviation)은 모든 물질에 대하여 0.39ng(n=5) 이하로 나타났고, 분석 정밀도(Precision)는 상대표준편차(RSD) 값이 6.7%(n=7)로 평가되었다. 검량선에 관한 점검(check)은 GC/FID 분석기간 동안 주기적으로 이루어졌다. 또한, 현장 공시료(Field Blank)도 계속적으로 확인한 결과 검출한계이하인 것으로 나타났다.

2.5. 배출속도 계산

배출속도 결과는 Guenther 등(1991)에 의해 제안된 방식에 따라 30°C 표준상태에서의 배출속도(Standard Emission Rate; ERs)를 산출하여 비교하였다¹⁰⁾. 모노테르펜의 ERs는 다음과 같은 식을 통하여 구할 수 있으며, 여기서 ln(ER)은 테르펜 배출속도의 자연 로그값($\mu\text{gC/gdw/h}$)이며, T는 VEC 내의 측정 온도(°C), b 또는 β (K⁻¹)는 경험식을 통해 얻어진 계수이다(절대값 b와 β value는 동일).

$$\ln(\text{ER}) = a + b(T)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙엽송으로부터 배출되는 모노테르펜

낙엽송의 잎에서 직접 배출되는 테르펜의 성분을 분석한 결과 α -pinene, myrcene, α -terpinene 이 주요하게 배출되는 것으로 확인되었고, 기타 camphene, β -pinene, d-limonene, β -phellandrene, γ -terpinene 등의 테르펜 물질이 배출되었다. 낙엽송으로부터 배출되는 테르펜의 구성비를 계절별로 비교한 결과가 그림 1과 표 2에 나타나 있다. 봄철 낙엽송의 테르펜 구성비 결과에서 α -terpinene이 34.7(±16.5)%로 가장 높게 나타났으며, α -pinene이 25.9(±7.8)%, myrcene이 16.5(±5.5)%의 순으로 나타나 이 세 가지 물질이 전체의 75.4%를 차지하였다. 여름철 낙엽송의 경우에는 α -pinene이 41.4(±16.5)%로 봄철에 비해서 약 15%정도 높게 나타났으며, α -terpinene이 33.2(±17.3)%, myrcene이 13.3(±3.1)%로 봄철과 비슷한 비율로 나타났다. 가을철의 경우에는 α -pinene이 39.9(±13.8)%로 높게 나타났으며, α -terpinene이 18.1(±8.6)%로 봄철과 여름철에 비해 비교적 낮은 비율로 나타났다(표 2).

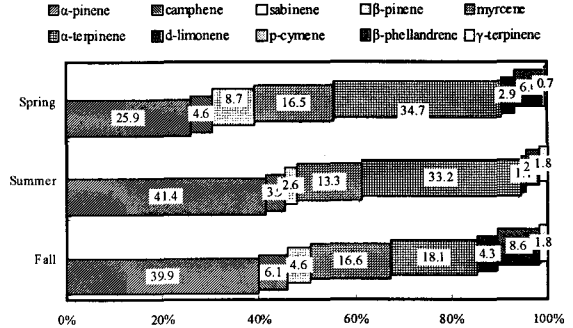


Fig. 1. Seasonal variation of monoterpene compositions.

Table 2. Composition of monoterpene compounds from *Larix Leptolepes*

Compounds	Composition (%)		
	Spring (n=23)	Summer (n=23)	Fall (n=23)
α -pinene	25.9± 7.8	41.4±12.4	39.9±13.8
camphene	4.6± 3.7	3.9± 2.3	6.1± 4.8
β -pinene	8.7± 6.3	2.6± 3.2	4.6±10.6
myrcene	16.5±15.5	13.3± 3.1	16.6± 6.7
α -terpinene	34.7±16.5	33.2±17.3	18.1± 8.6
d-limonene	2.9± 3.0	1.1± 1.3	4.3± 3.8
β -phellandrene	6.0± 4.5	2.7± 1.8	8.6± 5.3
γ -terpinene	0.7± 3.1	1.8± 2.6	1.8± 2.3
Total Terpene	100	100	100

낙엽송으로부터 배출되는 테르펜을 직접적으로 연구한 사례는 없었으나 Holm(1997)의 연구에서는 낙엽송의 잎으로부터 추출한 essential oil에 포함되어 있는 테르펜의 성분구성을 조사하였다²¹⁾. 그 결과 α -pinene이 28.8%로 가장 많은 양이 함유된 것으로 확인되었고, myrcene이 11.8%, 3-carene이 10.2%, β -pinene이 6.8%로 이들 테르펜들이 주요하게 함유되어 있는 것으로 조사되었다. 또한, camphene, sabinene, α -terpinene, p-cymene, limonene, β -phellandrene, γ -terpinene, terpinolene 등의 테르펜이 소량 함유되어 있는 것으로 확인되었다(Holm et al., 1997). 낙엽송으로부터 직접 배출되는 테르펜과 오일에 함유된 테르펜 물질을 비교하면 α -pinene과 myrcene이 주요 물질이라는 점은 유사하였으나, 잎에서는 α -terpinene이, 오일에서는 3-carene이 주요하게 배출되는 차이를 확인할 수 있었다.

그림 2에는 여름철 낙엽송에서 배출되는 8가지 모노테르펜의 온도에 대한 배출속도(ER) 추이가 나타나 있다. 각 물질에 대하여 온도와 ln(ER)값의 상관성을 살펴본 결과, 결정계수는 camphene($r^2=$

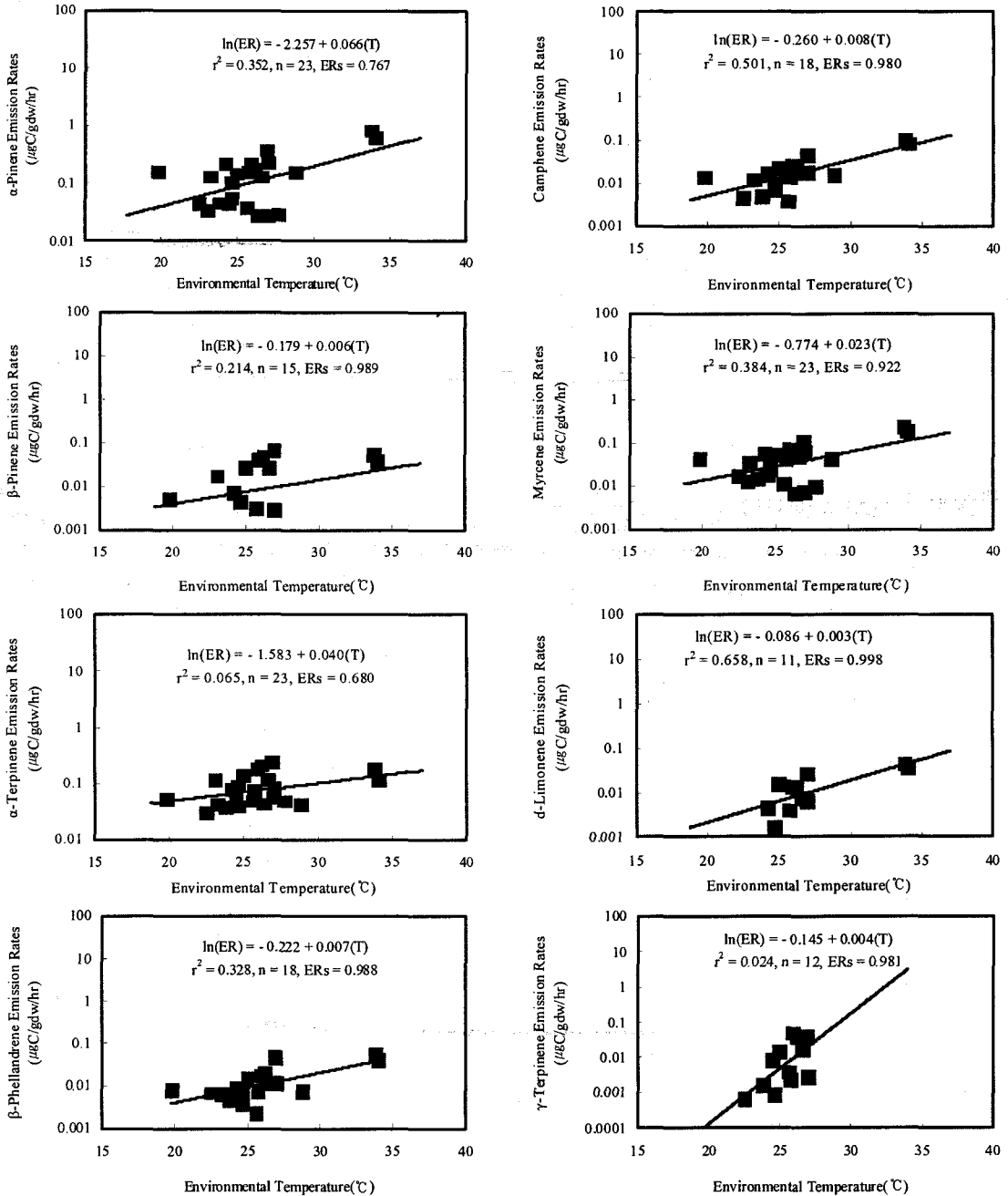


Fig. 2. Emission rates of individual monoterpene.

0.501)과 d-limonene($r^2=0.658$)로서 상대적으로 높게 나타났고, α -terpinene($r^2=0.065$)과 γ -terpinene($r^2=0.024$)은 상대적으로 낮게 나타났다. β 값은 α -pinene(0.066), myrcene(0.023), α -terpinene(0.040)에서 크게 나타났고, 기타 테르펜은 0.003 ~ 0.008의 범위로 나타났다. ERs 값은 α -pinene에서 0.767 $\mu\text{gC/gdw/h}$, α -terpinene에서 0.680 $\mu\text{gC/gdw/h}$ 로 나

타났고, 다른 테르펜의 ERs 는 0.922 $\mu\text{gC/gdw/h}$ ~ 0.998 $\mu\text{gC/gdw/h}$ 범위로 나타났다. 낙엽송의 여름철 구성비 결과에서 구성비율이 큰 α -pinene과 α -terpinene의 β 값과 ERs 값이 구성비율이 적은 다른 테르펜 물질과 큰 차이를 보여주었는데, α -pinene과 α -terpinene의 β 값은 5배 이상 크게 나타났고, ERs 값은 17% 이상 낮게 관찰되었다.

3.2. 낙엽송으로부터 배출되는 모노테르펜의 계절별 배출속도

그림 3은 낙엽송으로부터 배출되는 전체 모노테르펜의 온도에 따른 배출속도의 상관관계를 나타낸 그래프이고, 그림 4의 (a) ~ (c)는 3 계절의 배출속도 추이를 각각 나타낸 그래프이다. 이때, 계절별 시료 수는 각각 23개 이었으며, 2003년 봄철, 여름철, 가을철의 기간은 각각 5월 14일 ~ 7월 17일, 8월 12일 ~ 8월 26일, 9월 30일 ~ 10월 4일 이었다. 전체 기간에 대한 낙엽송의 모노테르펜 ERs는 0.455($\mu\text{gC/gdw/hr}$)으로 나타났고, β 값은 0.085로 나타났다(그림 3). 이때, 결정계수는 0.161로 다소 낮게 나타났다. 낙엽송의 계절에 대한 모노테르펜 배출 특성을 살펴본 결과 봄철의 ERs값은 0.457($\mu\text{gC/gdw/hr}$)이고, β 값은 0.141로 나타났다. 또한 결정계수(r^2)값이 0.498로 나타났다. 여름철 낙엽송의 β 값은 0.144로서 봄철과 비슷하게 나타났으며, r^2 값이 0.292로 나타났다. ERs값은 0.460($\mu\text{gC/gdw/hr}$)으로 봄철과 비슷하게 나타나 봄철과 여름철의 계절적인 차이가 비교적 적은 것을 고찰할 수 있었다. 가을철에는 봄, 여름철에 낙엽송 비교해 보았을 때 잎이 상당부분(약 40%) 노랗게 변색된 것을 확인 할 수 있었으며, 이러한 현상은 10월 초부터 점점 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 낙엽송의 온도에 따른 배출속도의 상관관계를 고

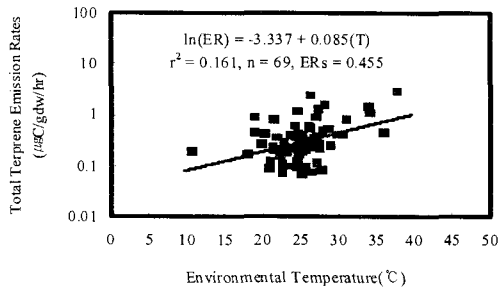
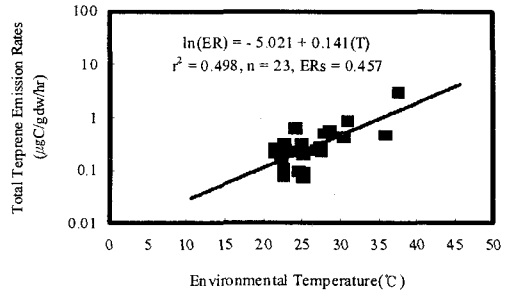
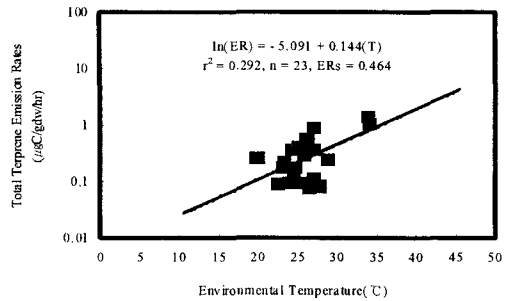


Fig. 3. Annual emission rates of monoterpene from *Larix Leptolepes*.

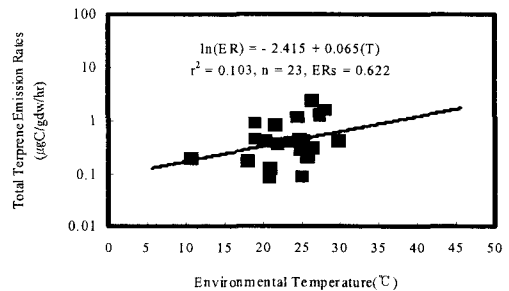
찰한 결과 r^2 값이 0.103이고, β 값은 0.065로 다른 계절에 비해서 2배 이상 낮아진 것을 확인 할 수 있었다. 또한 ERs값은 0.622($\mu\text{gC/gdw/hr}$)로 나타



(a) Spring



(b) Summer



(c) Fall

Fig. 4. Seasonal emission rates of monoterpene from *Larix Leptolepes*.

Table 3. Statistical relationship between terpene emission rate with temperature for *Larix Leptolepes*

	결정계수			X절편			Y절편		
	N	r^2	F값	b	Std Error	F값	a	Std Error	F값
An year	69	0.161	12.86***	0.085	0.024	3.59***	-3.34	0.604	-5.53***
Spring	23	0.498	20.81***	0.141	0.031	4.56***	-5.02	0.818	-6.14***
Summer	23	0.292	8.64**	0.144	0.049	2.94**	-5.09	1.280	-3.98***
Fall	23	0.103	2.42	0.065	0.042	1.55	-2.42	0.987	-2.45*

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

나 다른 계절의 배출속도보다 좀 더 높은 값을 나타내었다.

낙엽송으로부터 배출되는 모노테르펜 배출속도(ERs)의 계절적 변화를 통계적으로 비교하기 위하여 표 4와 같이 계절적 변화에 대한 ANOVA 테스트를 수행하였다. 이 때 온도 조건은 25°C(±2°C)이었으며, 유의 수준은 5%로 하였다. 그 결과 계절적 변화가 유의함을 확인 할 수 있었다(P<0.05).

3.3. 타 연구와의 비교

표 5에는 외국과 국내의 몇 가지 침엽수 수종에 대한 모노테르펜 배출속도와 β 값이 나타나 있다. 낙엽송은 소나무(과)에 속하지만 소나무(과)에 속하는 다른 침엽수와는 생리적으로 서로 상이한 특성을 갖는다. 국내의 수종을 대상으로 β(또는 b)값을 비교한 결과 본 연구에서 얻어진 낙엽송의 β값(0.102 ~ 0.144)은 소나무(*Pinus densiflora*)의 β값(0.138 ~ 0.190)과 리기다소나무(*Pinus rigida*)의 β값(0.042 ~ 0.062)의 중간 정도의 특성을 보였다. 국외 연구 결과와 비교할 때, 낙엽송의 β값의 범위는 외국 타 수종의 β값 범위(0.045 ~ 0.229)에 포함되는 것을 알 수 있었다. 낙엽송의 ERs 값의 범위는 0.457 ~ 0.622(μgC/gdw/hr)로 확인되었는데 이러한 낙엽송의 ERs 값의 범위는 리기다소나무 값의 범위(0.572 ~ 0.698 μgC/gdw/hr)보다 낮았고,

특히, 소나무 값의 범위(1.703 ~ 1.971 μgC/gdw/hr)보다 3배 정도 낮은 것을 알 수 있었다. 외국 수종의 경우 낮은 범위의 ERs(0.367 ~ 0.772 μgC/gdw/hr)를 갖는 수종과 상대적으로 높은 범위의 값(1.410 ~ 6.390 μgC/gdw/hr)을 갖는 수종들이 존재하는데 이 중 낙엽송은 낮은 범위에 속한다고 할 수 있다.

낙엽송의 ERs 값은 국내 수종 간 비교에서 3배 정도의 차이가 확인되었으며, 국외 수종에서도 큰 차이가 확인되었다. 이러한 ERs의 차이는 수목의 종류, 수령 등이 서로 다르고 식생의 성장 기후 및 비옥도 등에 따라서도 차이가 날 수 있으나 수종에 따른 배출량 차이가 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있었다. 현재 국내 수종에 대한 NVOC 배출특성 자료는 매우 부족한 실정으로 외국 수종과 그

Table 4. ANOVA results on variations of total terpene emission rates by season for *Larix leptoleis*

F value	P value	d.f(F)	d.f(E)
19.5	0.001	2	9

Note : ANOVA test, α-level = 5%, d.f. (F) = Degrees of freedom for factors, d.f. (E) = Degrees of freedom for errors.

Table 5. Comparison of Standard Emission Rates from Coniferous trees between this study and others

Researcher	Trees	β value (K ⁻¹)	ERs (μgC/gdw/hr)
Tingey et al (1980)	Slash pine needles (<i>Pinus elliottii</i>)	0.073	6.390
Janson (1993)	Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i>)	0.070	0.772
Tanner and Zielinska (1994)	Foothill pines (<i>Pinus sabiniana</i>)	0.074	0.560
V. Simon et al (1994)	Maritime pine (<i>Pinus pinaster</i> Ait.)	0.045	0.367
Kim (2001)	Slash and Loblolly pine (<i>Pinus elliottii</i> & <i>Pinus taeda</i>)	0.080 ~ 0.229	1.410~2.750
M. Komenda and R. Koppmann(2001)	Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i>)	0.080 ~ 0.130	0.053~3.265
H. Hakola et al (2003)	Norway Spruce (<i>Picea abies</i>)	0.110	0.393
김조천 (2003)	Japanese Red Pine (<i>Pinus densiflora</i>)	0.138 ~ 0.190	1.703 ~ 1.971
	Pitch Pine (<i>Pinus rigida</i>)	0.042 ~ 0.062	0.572 ~ 0.698
This research	Japanese Larch (<i>Larix leptolepis</i>)	0.102 ~ 0.144	0.457~0.622

특성이 다른 국내 수종들에 대한 NVOC 배출속도 연구가 확대될 필요성이 있으며, 이러한 결과들을 토대로 국내의 정확한 NVOC 배출량 산정이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

봄철 낙엽송의 테르펜 구성비 결과에서 α -terpinene, α -pinene, myrcene의 비율이 높게 나타났고, 여름철에는 α -pinene, α -terpinene, myrcene, 가을철에는 α -pinene, α -terpinene의 구성비가 높게 나타났다.

여름철 낙엽송에서 배출되는 8가지 모노테르펜의 온도에 대한 개별 배출속도(ERs) 추이결과 α -pinene, myrcene, α -terpinene의 β 값이 상대적으로 높게 나타났고, α -pinene, α -terpinene의 ERs 값이 상대적으로 낮게 나타났다. 낙엽송의 여름철 구성비 결과에서 구성비율이 큰 α -pinene과 α -terpinene의 β 값(5배 이상 큼)과 ERs 값(17% 이상 적음)이 구성비율이 적은 다른 테르펜 물질과 비교해 보았을 때 큰 차이를 나타내었다.

전체 기간에 대한 낙엽송의 모노테르펜 ERs는 0.455($\mu\text{gC/gdw/hr}$)으로 나타났고, β 값은 0.085로 나타났다. 봄철 ERs값은 0.457($\mu\text{gC/gdw/hr}$)이고, β 값은 0.141로 나타났고, 여름철 ERs값은 0.460($\mu\text{gC/gdw/hr}$), β 값은 0.144으로 나타났다. 가을철 결과에서 ERs값은 0.622($\mu\text{gC/gdw/hr}$), β 값은 0.065로 다른 계절에 비해서 2배 이상 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 또한, ERs의 계절적 변화를 확인하기 위하여 통계적 분석을 수행한 결과 계절적 변화가 유의함을 확인할 수 있었다.

국내의 수종을 대상으로 β (또는 b)값을 비교한 결과 본 연구에서 얻어진 낙엽송의 β 값은 소나무(*Pinus densiflora*)와 리기다소나무(*Pinus rigida*)의 중간정도 범위를 보였고, 국외 수종의 β 값 범위에 포함되는 것을 알 수 있었다. 낙엽송의 ERs 값의 범위는 리기다소나무 값의 범위보다 낮고, 소나무 값의 범위보다 3배 정도 낮은 것을 알 수 있었다. 이러한 ERs의 차이는 수목의 종류, 수령 등이 서로 다르고 식생의 성장 기후 및 비옥도 등에 따라서도 차이가 날 수 있으나 수종에 따른 배출량 차이가 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있었다. 현재 국내 수종에 대한 NVOC 배출특성 자료는 매우 부족한 실정으로 외국 수종과 그 특성이 다른 국내 수종들에 대한 NVOC 배출속도 연구가 확대될 필요성이 있으며, 이러한 결과들을 토대로 국내의 정확한 NVOC 배출량 산정이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Michael. E. H. et al., 1997, The tropospheric degradation of volatile organic compounds: A protocol for mechanism development, Atmospheric Environment, 3(1), 81-104.
- 2) Nunes, T. V. and Pio C. A., 2001, Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests, Chemosphere-Global Change Science, 3(3), 239-248.
- 3) Harrison, D., Hunter, M. C., Lewis, A. C., Seakins, P. W., Nunes, T. W. 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, 4687-4698.
- 4) Went, F. W., 1960, Organic matter in the atmosphere and its possible relation to petroleumformation, Proc. Nat. Acad. Sci., U.S.A, 46, 212-221.
- 5) Finlayson-Pitts, B. J. and Pitts J. N. N., 1993, Atmospheric chemistry of tropospheric ozone: scientific and regulatout implications, J. Air Waste Man. Ass., 43, 1091-1100.
- 6) Arey, J., E. C. David, C. Margaret, R. Margaret, and L. Julia, 1995, Hydrocarbon emissions from natural vegetation in California's south coast air basin, Atmos. Environ., 29(21), 2977-2988
- 7) 김조천, 홍지형, 강창희, 선우영, 김기준, 임준호, 2004, 침엽수로부터 발생하는 방향성 테르펜의 배출속도 비교 연구, 한국대기환경학회, 20(2), 175-183.
- 8) Rasmussen, R. A. and C. A. Jones, 1973, Emission of isoprene from leaf discs of Hammameis, Photochem, 12, 15-19.
- 9) Tingey, D. T., 1981, The effect of environmental factors on the emission of biogenic carbons from live oak and slash pine, In "Atmospheric Biogenic Hydrocarbons" (J. J. Bufalini and R. R. Arnsts, eds.). 1, Emissions, 53-79.
- 10) Guenther, A. B., R. K. Monson and R. Fall, 1991, Isoprene and monoterpene rate variability: observations with Eucalyptus and emission rate algorithm development, J. Geophys. Res., 96(D6), 10799-10808.

- 11) Trapp, D. et al., 2001, Isoprene and its degradation products methyl vinyl ketone, methacrolein and formaldehyde in a eucalyptus, Chemosphere-Global Change Science, 3, 295-307.
- 12) Owen, S., C. Boissard, R. A. Street, S. C. Duckham and C. C. Hewitt, 1997, The BEMA-project: screening of 18 Mediterranean plant species for volatile organic compound emission, Atmospheric Environment, 31, 101-117.
- 13) Kim, J. C., 1995, Monoterpene emissions from pine trees and their contributions to ambient air quality in a southeastern pine forest, University of Florida
- 14) Zimmerman, P. R., 1979, Testing of Hydrocarbon Emissions from Vegetation, Leaf Litter and Aquatic Surfaces, and Development of a Methodology for Compiling Biogenic Emission Inventories. EPA-450/4-79-004, U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA).
- 15) Winer, A. M., D. R. Fitz and P. R. Miller, 1983, Investigation of the Role of Natural Hydrocarbons in Photochemical Smog Formation in Calif., Contract #A0-056-32, Air Resour., Board, Sacramento.
- 16) Kim, J. C., 2001, Factors controlling natural VOC emissions in a southeastern US pine forest, Atmospheric Environment, 35, 3279-3292.
- 17) Kim, J. C., 2001, Development of a Novel Sampling Technique for Natural VOC emissions, J. Korean Society for Atmospheric Environment, 17(E2), 61-70.
- 18) Kesselmeier, J., L. Schafer, P. Ciccioli, E. Brancaleoni, A. Cecinato, M. Frattoni, P. Foster, V. Jacob, J. Denis, J. L. Fugit, L. Dutaur and L. Torres, 1996, Emission of monoterpenes and isoprene from a mediterranean oak species *Quercus ilex L.* measured within the bema (Biogenic emissions in the mediterranean area) project, Atmospheric Environment, 30(10/11), 1841-1850.
- 19) Komenda, M., E. Parusel, A. Wedel and R. Koppmann, 2001, Measurements of biogenic VOC emissions: sampling, analysis, and calibration, Atmospheric Environment, 35, 2069-2080.
- 20) 김조천, 김기준, 홍지형, 선우영, 임수길, 2004, 여름철 참나무속의 이소프렌 배출속도 비교에 관한 연구, 한국대기환경학회, 20, 1.
- 21) Holm, Y. and Hiltunen, R., 1997, Variation and inheritance of monoterpenes in *Larix* species., Flavour Fragrance J., 12, 335-339.