

침엽수로부터 발생하는 방향성 테르펜의 배출속도 비교 연구 Comparison of Monoterpene Emission Rates from Conifers

김조천* · 홍지형¹⁾ · 강창희²⁾ · 선우영 · 김기준 · 임준호
건국대학교 환경공학과, ¹⁾국립환경연구원 대기공학과, ²⁾제주대학교 화학과
(2003년 2월 3일 접수, 2004년 2월 24일 채택)

Jo-Chun Kim*, Ji-hyung Hong¹⁾, Change-Hee Gang²⁾,
Young Sunwoo, Ki-Joon Kim and Jun-Ho Lim
Department of Environmental Engineering, Konkuk University
¹⁾Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research
²⁾Department of Chemistry, Jeju National University
(Received 3 February 2003, accepted 24 February 2004)

Abstract

In order to investigate the composition ratio and the emission rate of monoterpenes emitted from coniferous trees during summer, the enclosure chamber experiments were carried out for two tree species (*Pinus densiflora* and *Pinus rigida*). The major monoterpenes from the pine trees were α -pinene, β -pinene, myrcene and β -phellandrene. There was no difference of the composition ratio between two sites for *P. densiflora*, but the difference was observed for *P. rigida*. Clearly, the ratio of β -pinene (26.1%) for *P. rigida* was higher than that of β -phellandrene (12%) at the Gumsung mountain site, but the ratio of β -phellandrene (22.2%) was higher than that of β -pinene (9.9%) at the Chiri mountain site. Particularly, the composition ratio of β -phellandrene was higher than that of β -pinene for *P. densiflora*, and the opposite trend was found for *P. rigida* at the Gumsung mountain site. The characteristics of the composition ratio between two species were similar at the Chiri mountain site. As a result of the emission rate measurements, it was observed that both sites did not show any significant β value (slope between emission rate and temperature) and ERs (Standard Emission rate at 30°C) difference. However, the β value and ERs at the Chiri mountain site were slightly greater than those of Gumsung mountain site for both pine species. *P. densiflora* (1.703 and 1.971 $\mu\text{gC/gdw/hr}$) showed the higher monoterpene ERs than those of *P. rigida* (0.572 and 0.698 $\mu\text{gC/gdw/hr}$) at both sites.

Key words : Monoterpene, ERs, β value, *Pinus densiflora*, *Pinus rigida*

1. 서 론

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

우리나라의 대기 중 오존농도는 해마다 높아져 오
존주의보 발령일수가 1998년에는 14일간 (38회),

1999년에는 16일간(41회), 2000년에는 17일간(52회)으로 증가추세에 있다(환경부, 2001). 따라서 환경부에서는 대기 중 오존 농도 감소를 위해서 인위적인 휘발성유기화합물(VOC) 규제 등의 많은 노력을 기울이고 있다. 한편 자연적으로 배출되는 VOC(NVOC) 양은 인위적인 VOC 배출량을 초과하는 것으로 보고되고 있다(Guenther *et al.*, 1995). 현재 식생에서 배출되는 전 지구적 자연VOC 총량은 약 1150 TgC/yr로 추정된다(Fehsenfeld *et al.*, 1992). 자연 배출원에 의해 배출되는 VOC는 광화학 반응에 의한 오존 생성에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 왔다(Chameides *et al.*, 1988). 또한 에어로졸의 형성 등 전 지구적 대기 화학반응과 비도시 지역의 산성침적에 기여하는 유기산의 생성 등에 주요한 영향을 끼친다(Coeur *et al.*, 1999; Odum *et al.*, 1996; Fehsenfeld *et al.*, 1992). 특히 우리나라는 전국토의 65%가 산림이고, 그 중 침엽수림이 44.7%에 이르고 있기 때문에 우리나라에서도 대표적인 NVOC인 모노테르펜(Monoterpene)에 대한 관심이 점점 커지고 있다(산림청, 2001).

NVOC의 주요한 배출원은 식생류이며, 주요한 NVOC로는 이소프렌(Isoprene, C_5H_8)과 모노테르펜($C_{10}H_{16}$)을 들 수 있고(Harrison, 2001), 모노테르펜은 주로 침엽수림에서 배출된다. 수종별 차이를 제외하고도 온도, 빛, 습도 등의 많은 환경변수에 의해서 모노테르펜 배출량은 영향을 받으며, 계절변화에 대해서도 영향을 받는 것으로 알려지고 있다(Owen *et al.*, 1997). 미국과 유럽을 중심으로 한 선진 외국의 경우 여러 수종에 대한 배출특성 연구들이 1980년대 이래 꾸준히 진행되고 있다. 특히, 침엽수에서 배출되는 모노테르펜에 대한 측정방법과 배출량을 제어하는 환경적 인자들의 계절적 다양성 등도 관심있게 연구되고 있다(Staudt *et al.*, 1997). 우리나라의 경우 인위적인 배출원에 대한 자료는 몇 년 전부터 구체적인 배출원별 배출실태 파악이 이루어지고 있지만, 자연발생적 VOC 배출량의 측정 및 추정이 매우 미흡한 실정이다. 지금까지 우리나라 NVOC 배출량은 외국자료에 의존하여 추정되어 왔다. 최근, 지동영 등(2002)은 소나무와 잣나무를 대상으로 NVOC 배출물질 구성성분 및 구성비를 비교한 바 있으나, 이는 상대적 배출량 비교를 위한 준 정량적인 연구로 한정되기 때문에 우리나라 특성에 맞는 NVOC 배출량 산정을 위해서는 보다 정량적인 연구가 필요한 실정

이다.

본 연구의 주요 목적은 국내 침엽수의 87% 이상을 차지하는 소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zuccarini)와 9%를 차지하는 리기다소나무(*Pinus rigida* Mill., 이하 리기다)를 대상으로 정량적인 수종간 배출속도(Emission rate)를 측정하여 비교 하는 것이다. 또한 모노테르펜의 배출량 구성비를 비교하여 모노테르펜 각각의 물질에 대한 배출특성을 수종별로 비교 하고자 하였다. 본 연구는 광화학 반응이 가장 활발한 여름철을 대상으로 이루어진 것으로, 국내에서는 처음으로 정량적인 테르펜의 배출속도를 측정 및 분석하는 시도를 하였다는 점에서 큰 의의가 있다고 사료된다. 또한 내륙과 해안의 상이한 기후 및 여러 성장 조건 차이에 따른 배출속도를 비교하기 위하여 소규모적으로 해안 기후 특성을 지닌 제주도지역에서 자란 소나무와 내륙지역인 전라남도 나주에서 자란 동일한 수령(3령)의 소나무를 가지만을 채취하여 동일조건에서 비교 연구를 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 침엽수로부터 배출되는 NVOC를 샘플링 하기 위한 방법으로 semi-static enclosures(Zimmerman *et al.*, 1979a)나 dynamic flow-through chamber(Winer *et al.*, 1983)와 같은 기존 방법을 보완하여 개발한 Vegetation Enclosure Chamber를 사용하였다(Kim, 2001a). 실험에 앞서 chamber내의 NVOC의 혼합현상과 평형농도에 도달되는 시간을 알아보기 위한 실험이 수행되었다(Kim, 2001b). Zero air system (Model 701, API, USA), 진공펌프(N035.1.2AN.18, Neuberger, USA), MFC (Mass Flow Controller, 2000-5CH, GMATE, Germany) 등이 본 연구에 사용되었다.

2.2 수종의 선택

우리나라의 전국 침엽수의 임야면적은 867,315 (ha)로서 이 중에서 소나무가 87%를 차지하고 있고 리기다(*Pinus rigida* Mill.)는 9%를 차지하고 있다. 이와 같이 우리나라에서 자생하는 소나무속의 침엽수 중 가장 대표적인 수종은 소나무와 리기다이므로

본 연구에서는 두 수종을 선정하였다. 침엽수의 수령별 차이에 의해서도 모노테르펜의 배출량이 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Isebrand *et al.*, 1999; Street *et al.*, 1997). 이러한 침엽수의 수령에 따른 배출특성 차이를 고려하여 대표적인 수령을 문헌을 통하여 조사한 결과, 침엽수의 대표적 수령은 II령~III령(11~30년생)으로 확인되었다(산림청, 2001). 본 연구에서는 전라남도 지역의 대표적인 수령인 III령 소나무와 II령 리기다를 대상으로 연구를 수행하였다.

연구 대상시기는 사계절 중 가장 대표적인 계절인 여름철로서 2002년 8월 17일부터 2002년 9월 18일 사이에 이루어졌으며, 이때 온도조건은 17~35 (°C) 이었다. 대상지역은 1차적으로 대전 이남으로 하였으며, 이 중에서 전라남도에도 소재한 금성산 일대(35° 04'N, 126° 66'W)와 경상도와 전라도의 중간지점에 위치한 지리산 일대(35° 37'N, 127° 52'W)가 대상 지역으로 선정되었다. 이 두 지역은 다양한 수종이 골고루 분포되어 있으며 침엽수림이 잘 발달되어 있다. 이러한 두 지역은 서로간의 기후 및 토질 등 성장 환경이 다르므로 배출량이 다를 수 있다는 점에 착안하여 선정하게 되었다.

2. 3 샘플링방법

시료 포집은 흡착트랩법을 이용하였으며, 이때 사용된 흡착트랩은 Tenax TA (60/80 mesh, Supelco, USA) 110 mg과 CarbosieveTM S III (60/80 mesh, Supelco, USA) 60 mg을 채운 pyrex 흡착관이다(Komenda *et al.*, 2001; Owen *et al.*, 1998; Kesselmeier *et al.*, 1996). 실질적인 분석에 앞서 흡착트랩의 성능시험을 수행한 결과 94.7% (±4.5%)의 회수율이 얻어졌고, 상대표준편차(RSD)는 4.7%로 나타났다. 흡착트랩 준비를 위하여 3시간동안 280°C에서 cleaning을 하였으며, 사용 전에 trap blank test를 통하여 trap의 cleaning 상태를 확인하였다. 샘플링 유량은 100~200 ml/min이었고, 시료채취 후 24시간 이내에 분석이 수행되었다.

2. 3 분석방법

시료 흡착에 의해 얻어진 샘플트랩(Sample Trap)은 현장에서 저온(4°C 이하) 저장하여 실험실로 운반되었으며, 정성분석을 위하여 Cryogenic system인 자동열탈착장치(Tekmar 6000, Tekmar-Dohrmann,

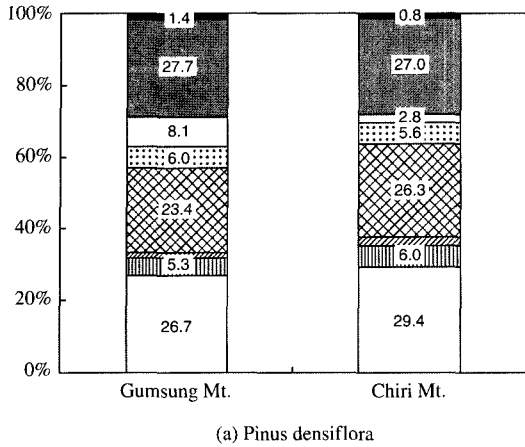
USA)와 GC/MSD (HP6890/HP5973 Hewlett Packard, USA) 시스템을 동시에 이용하여 분석하였다. 정량분석을 위하여 또 다른 동일한 자동열탈착장치(Tekmar 6000, Tekmar-Dohrmann, USA)와 연결된 GC/FID (HP5890 Hewlett Packard, USA) 시스템이 이용되었다. MSD용 Column으로는 HP-624 Capillary (60m × 0.32 mm, 1.8 μm)가 사용되었고, FID용 Column으로는 DB-624 Capillary (60 m × 0.53 mm, 3 μm)가 사용되었다. MDL (Method Detection Limit, 3 standard deviation)는 모든 물질에 대하여 0.39 ng (n=5) 이하로 나타났고, 분석 정밀도는 상대표준편차(RSD) 값이 6.7% (n=7)로 나타났다. FID를 이용하여 α-pinene, β-pinene, d-limonene, isoprene 등 여러 물질의 검량선을 작성한 결과 모든 물질의 결정계수(r²) 값이 0.999 이상으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

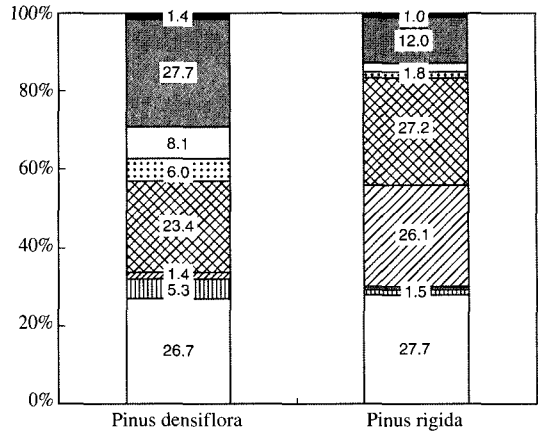
3. 1 테르펜 배출량 구성비의 지역간 및 수종간 비교

침엽수로부터 배출되는 모노테르펜의 물질별 배출특성을 알아보고, 소나무와 리기다의 수종별 구성비 차이와 금성산과 지리산의 지역간 구성비의 차이를 알아보기 위하여 여름철에 두 지역에서 두 수종을 대상으로 연구가 수행되었다. 소나무(a)와 리기다(b)의 모노테르펜 배출구성비를 지역간으로 비교한 그래프가 그림 1에 나타나 있다. 침엽수에서는 10여종의 다양한 모노테르펜 물질들이 배출되는 것으로 확인되었고, 물질별로 배출량의 차이가 크게 나타났다.

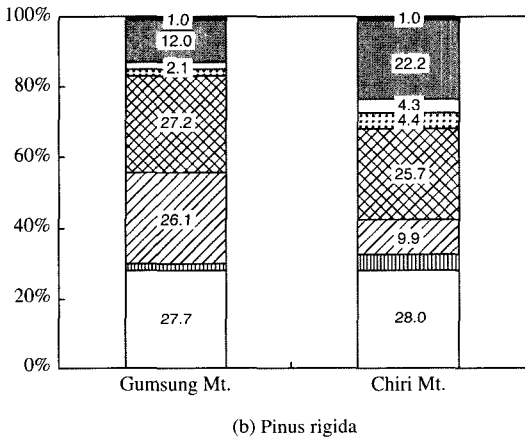
두 수종에 대한 지역간 배출특성 차이를 살펴보면, 금성산 소나무에서는 α-pinene, myrcene, β-phellandrene이 전체 모노테르펜의 77.8%로 나타났고, 지리산 소나무에서는 이들 세 물질이 전체의 82.7%로 확인되어 두 지역 소나무의 테르펜 배출 구성비는 유사하였다. 또한, 금성산 리기다의 경우는 α-pinene, β-pinene, myrcene이 전체의 모노테르펜의 81.0%로 이들 물질이 대부분을 차지하였으며, β-phellandrene도 일부 배출되었다. 반면에 지리산 리기다에서는 α-pinene, myrcene, β-phellandrene이 75.9%로 주로 배출되었으며, 일부 β-pinene이 배출되었다. 리기다의 경우에는 금성산에서 β-pinene (26.1%)이 β-



(a) *Pinus densiflora*



(a) Gumsung mountain site



(b) *Pinus rigida*

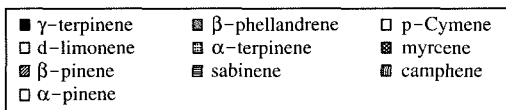
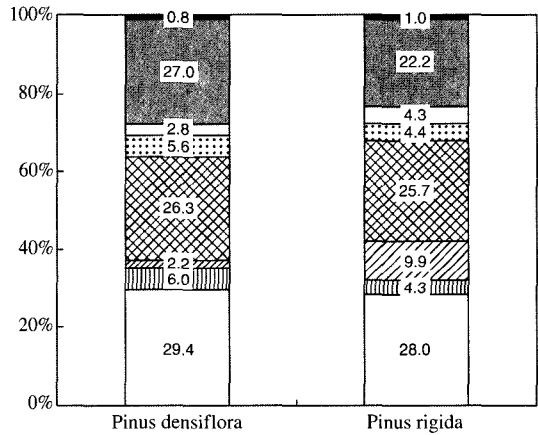


Fig. 1. Composition of monoterpenes by region in summer.

phellandrene (12.0%)보다 높은 비율로 배출되었고, 지리산에서는 β -phellandrene (22.2%)이 β -pinene (9.9%)보다 높게 배출되는 상이함이 나타났다. 소나무 수종에서는 지역간의 모노테르펜 배출 구성비 차이가 크지 않은 반면에 리기다 수종에서는 지역간 차이가 다소 존재함을 알 수 있었다.

두 지역에서의 수종에 따른 모노테르펜 배출구성비 비교가 그림 2에 나타나 있다. 금성산 소나무에서는 α -pinene, myrcene, β -phellandrene이 주요한 모



(b) Chiri mountain site

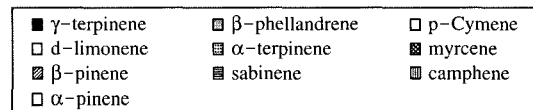


Fig. 2. Composition of monoterpenes by species in summer.

노테르펜인 것으로 나타났으나, 금성산의 리기다 경우는 α -pinene, β -pinene, myrcene의 배출 비율이 높은 것으로 나타났고, β -phellandrene (12.0%)이 일부 배출되었다. 금성산 소나무에서는 β -phellandrene이 β -pinene보다 상대적으로 높은 비율로 배출되었고, 반면 리기다에서는 그 반대의 경향이 나타났다. 지리산 지역 침엽수의 모노테르펜 구성비를 수종별

로 비교한 결과(그림 1(b)), 소나무의 주요한 모노테르펜으로 α -pinene, myrcene, β -phellandrene이 확인되었고, 적은 양의 d-limonene (2.8%)이 확인되었다. 지리산 리기다에서는 소나무와 마찬가지로 이들 세 물질이 모노테르펜의 대부분을 구성하였고, 일부 β -pinene (약 10%)이 확인되었다. 지리산의 두 침엽수에서 α -pinene, myrcene, β -phellandrene이 주요하게 배출되는 부분은 유사하였으나, d-limonene의 구성비에서 약간의 차이가 나타났다. 결과적으로 소나무에서는 금성산과 지리산의 지역간 모노테르펜 구성비가 거의 일치하였고, 리기다의 경우는 다소 지역적인 차이가 있는 것으로 나타났다.

소나무에 대한 모노테르펜 배출 특성의 연구는 국외의 타 연구자들에 의해서 몇 차례 연구된 바 있다. Yokouchi and Ambe (1984)는 greenhouse에서 2년간 기른 소나무 묘목을 대상으로 빛, 온도, 습도에 따른 모노테르펜 배출 특성을 연구하였다. 그 결과 소나무로부터 배출되는 주요한 모노테르펜 물질로 α -pinene, β -pinene, myrcene, β -phellandrene 등이 배출된다고 보고하였고, α -pinene을 기준으로 하였을 때 그 양의 비율이 1, 0.73, 0.92, 0.87로 각각 나타났다. 이러한 Yokouchi and Ambe (1984)의 연구 결과는 α -pinene, myrcene, β -phellandrene이 가장 많은 양으로 배출된다는 점에서 본 연구의 소나무 결과와 유사한 것을 알 수 있었다. 또한, Tani *et al.* (2002)은 소나무 숲의 canopy 높이에서 모노테르펜의 농도를 측정하고, α -pinene, d-limonene과 β -phellandrene의 혼합물이 높게 나타났으며, β -pinene이 다소 낮게 나타난 것으로 보고하였다. 지동영 등(2002)의 연구에서는 준 정량적이기는 하지만 우리나라 소나무에서 α -pinene이 가장 높은 구성비로 배출되는 것으로 나타났으며, β -pinene, camphene, limonene 등의 물질이 배출되는 것으로 보고하였다.

3.2 지역에 따른 침엽수의 배출속도

침엽수에서 배출되는 물질으로써 주로 모노테르펜이 배출된다. 이러한 모노테르펜을 발생시키는 직간접적인 인자로서 온도와 PAR가 주요하게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Tingey *et al.*, 1980). 따라서, 온도와 PAR 조건이 4계절 중 가장 높게 나타나는 여름철에 지역적인 배출속도 차이를 연구하게 되었다. 금성산과 지리산에서 소나무(3령)와 리기다(2령)를 대

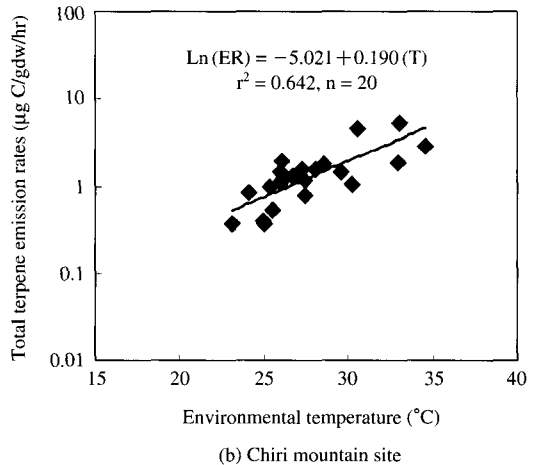
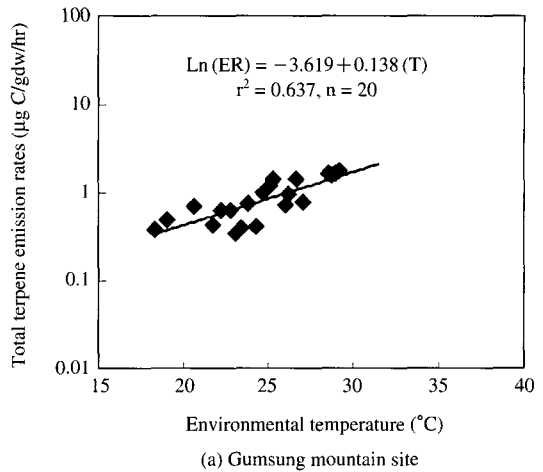


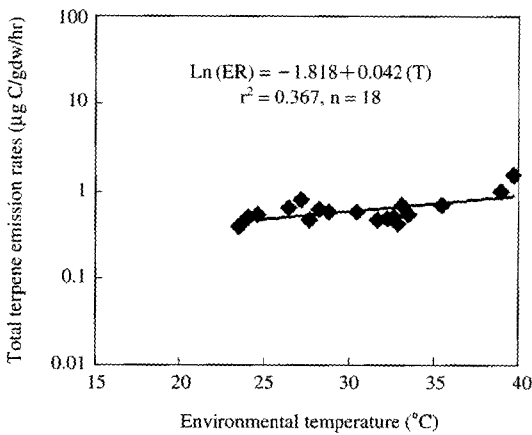
Fig. 3. Variations of total monoterpene ERs by temperature for *Pinus densiflora* in summer.

상으로 여름철(2002년 8월 17일~9월 18)의 배출속도를 측정하고, 그 결과가 그림 3~4에 나타나 있다. 온도와 배출속도(Emission Rate: ER)와의 관계는 Tingey (1980)가 제안한 식에 따라 도표상에 나타내었으며, 구체적인 방법은 Kim (2001a)의 연구에 잘 나타나 있다. 이러한 결과는 Guenther *et al.* (1991)에 의해 제안된 방식에 따라 30°C 표준상태에서의 배출속도(Standard Emission Rate: ERs)를 산출하여 비교하였다.

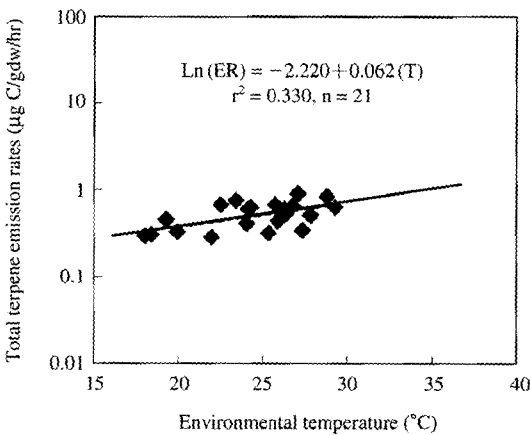
소나무의 경우에는 상관계수(r^2)가 금성산과 지리산에서 0.637과 0.642로 나타났고, 기온이 값인 β 값

은 금성산과 지리산에서 0.138과 0.190으로 나타나 큰 차이는 없었으나 지리산에서 온도에 따른 ERs 값의 변화가 좀더 큰 것으로 나타났다. ERs는 금성산과 지리산에서 1.703과 1.971 (µgC/gdw/hr)로 나타나 β값과 마찬가지로 큰 차이는 보이지 않았으나 지리산에서 총 모노테르펜양이 약간 더 많이 배출되는 것으로 나타났다.

리기다의 여름철 지역별 ERs를 측정한 결과가 그림 4에 나타나 있다. 리기다의 경우 금성산과 지리산의 상관계수(r^2) 값은 0.367과 0.330으로 나타나 소나무에 비해 온도에 따른 배출량의 상관성이 다소



(a) Gumsung mountain site



(b) Chiri mountain site

Fig. 4. Variations of total monoterpane ERs by temperature for *Pinus rigida* in summer.

떨어지는 것으로 나타났다. β값은 금성산과 지리산에서 0.042와 0.062로 나타나 지리산의 경우에 좀더 높게 나타났다. ERs 값은 금성산과 지리산에서 0.572와 0.698 (µgC/gdw/hr)로 지리산의 리기다가 좀더 높게 나타났으나 지역별로는 큰 차이가 나타나지 않았다.

소나무와 리기다를 비교하였을 때 두 지역 모두 소나무의 β값이 크게 나타나 소나무가 리기다보다 온도에 대한 변화가 좀더 큰 것으로 나타났다. 또한, ERs값에서도 소나무의 경우가 리기다보다 훨씬 크게 나타나 소나무가 상대적으로 많은 양의 모노테르펜을 배출하는 것으로 나타났다. 지역간 침엽수의 배출속도 차이나 수종간의 차이를 연구하기 위해서는 각각의 계절별 연구와 좀더 광범위한 지역에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

3.3 나주지역(금성산)과 제주지역 소나무의 배출속도 비교

모노테르펜 배출량의 차이는 수종별 차이를 제외하고도 온도, 빛, 습도 등의 많은 환경변수에 의해서 영향을 받으며, 토지의 비옥도 등의 여러 성장환경에 따라서 영향을 받을 수 있다. 그림 5에는 소나무(23년생)를 대상으로 성장환경이 매우 다른 나주지역과 제주지역의 배출특성을 비교하여 나타내었다. 실험시의 온도 조건은 여름철 9월의 평균온도인 25°C를 동일하게 적용하였으며, 현장에서 실시하는 실험과 동일한 방법으로 가지를 채취하여 실내에서 실험을 수

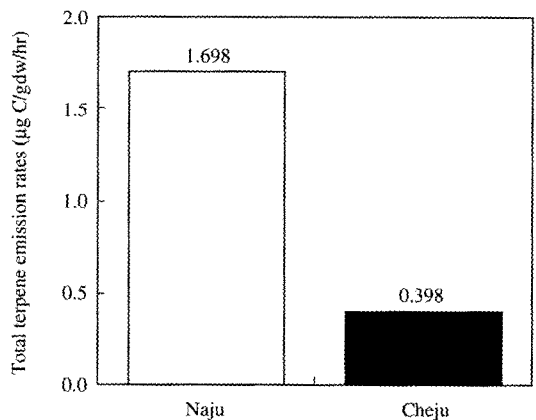


Fig. 5. Regional comparison of total monoterpane ERs in summer.

행하였다. 나주지역 소나무의 ER (25°C)값은 1.698 (µgC/gdw/hr)이었으나, 제주지역의 값은 0.398 (µgC/gdw/hr)로 나주지역에 비하여 매우 낮게 나타났다. 동일한 수종일지라도 토질 등을 포함한 성장조건이나 기후조건이 다른 지역 간의 NVOC 배출량에 상당한 차이가 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 두 지역의 성장조건과 기후 조건 등 배출량에 영향을 미칠 수 있는 영향인자는 매우 다양하다. 다양한 영향인자 때문에 두 지역의 차이를 규명하기 위해서는 많은 연구가 필요하다. 그러나 본 연구는 국내에서 처음으로 시도되는 환경변수에 대한 정량적인 연구로서 환경에 따른 배출량의 차이를 확인하는 데는 충분하다고 판단되나, 향후 조건이 상이한 각 지역 간의 비교실험이 매우 필요하다고 사료된다.

3. 4 외국의 연구사례와의 비교

현재 외국의 소나무들과 국내 소나무들을 비교하여 보면 침엽수림이라는 점에서는 서로 공통점이 있지만, 수종 그 자체는 서로 매우 상이하다. 표 1에는 침엽수에 대한 β값을 나타내었다. 본 연구의 소나무와 리기다의 β값의 범위 (0.042~0.190)가 외국 수종에 대한 β값의 범위 (0.070~0.311)에 포함되는 것을 알 수 있었다. 그러나 절대적인 배출속도 값 (µgC/gdw/hr)은 본 연구에서 소나무 (1.703, 1.971)와 리기다 (0.572, 0.698)간에 약 3배 가량 차이를 나타내었다. 본 연구의 수종에 대한 결과를 미국의 경우와 비

교하면 slash pine (6.39) (Tingey *et al.*, 1980) 또는 loblolly pine (2.748) (Kim, 2001) 등과는 수종에 따라서 차이 (2~3배 이상)를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 수목의 종류, 수령 등이 서로 다르고 식생의 성장 기후 및 비옥도 등이 다르기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 본 연구에서는 온도 뿐만 아니라 수령에 따른 배출량 차이도 나타나 수령에 따른 배출계수연구도 매우 중요함을 알 수 있었다.

광화학 반응의 측면에서 볼 때, 국내의 소나무에서는 주로 α-pinene, β-pinene, myrcene, β-phellandrene 등이 배출되는데 α-pinene ($5.4 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$)이나 β-pinene ($7.9 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$)의 OH 라디칼과의 반응상수보다 myrcene ($21.5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$)이나 β-phellandrene ($16.8 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$)의 반응 상수가 3배 가량 크다고 알려져 있다 (Calogirou *et al.*, 1999). 이러한 관점에서 볼 때, 미국의 slash pine의 경우에는 α, β-pinene이 약 90% 가량을 차지한다 (Kim, 2001; Tingey *et al.*, 1980). 반면 국내의 소나무에서는 myrcene, β-phellandrene이 높은 비율 (51.1%)로 배출된다. 즉, 국내 침엽수 중 대부분을 차지하는 소나무에서는 반응성이 α, β-pinene보다 3배 가량 높은 myrcene과 β-phellandrene 물질이 많은 양으로 배출되고 있어 국내 광화학 스모그 발생에 더 큰 영향을 미칠 수 있어 주목된다. 국내의 도시 대기 중의 대기질 개선을 위해서는 반응성이 강한 테르펜 물질을 많이 배출하는 소나무 보다는 이들 물질의 구성비가 적은 나무를 선택하여 식종하는 것이 유리하다고 판단된다. 또한, 국내의 도시 대기질 개선을 위해서는 국내 수종에 대한 배출속도 뿐만 아니라 모노테르펜의 물질별 배출특성을 연구하는 것도 매우 중요하다고 사료된다.

Table 1. Comparison of β values from coniferous trees between this study and others.

Researcher	Trees	β value (K ⁻¹)
Tingey <i>et al.</i> (1980)	Slash pine needles	0.073
Juuti <i>et al.</i> (1990)	Monterery pines	0.085 (±0.027)
Lamb <i>et al.</i> (1987)	Different tree species	0.131
Janson (1993)	Scots pine	0.070
Tanner and Zielinska (1994)	Foothill pines	0.074
Owen <i>et al.</i> (1997)	Mediterranean plant species	0.079~0.311
Guenther <i>et al.</i> (1993)	Not-Mediterranean plant species	0.090 (±0.080)
Street <i>et al.</i> (1997a, b)	<i>Q. Ilex</i> and <i>P. pinea</i>	0.230 (±0.160)
Kim (2001)	Slash and Loblolly pine	0.080~0.229
This study	<i>Pinus densiflora</i>	0.138~0.190
	<i>Pinus rigida</i>	0.042~0.062

4. 결 론

본 연구에서는 침엽수로부터 배출되는 모노테르펜의 배출속도를 측정하기 위하여 두 수종을 선정하여 두 지역에서 배출속도를 모노테르펜 물질별로 측정하였다. 그 결과 침엽수로부터 10여종의 모노테르펜 물질이 배출되는 것이 확인되었고, 이들 구성비율의 차이가 확인되었다. 여름철 소나무와 리기다의 지역

별(금성산, 지리산) 모노테르펜 구성물질 및 구성비율을 비교하였을 때, 소나무에서 배출되는 주요 모노테르펜은 α -pinene, myrcene, β -phellandrene으로 두 지역에서 유사하게 나타났다. 리기다에서 배출되는 모노테르펜으로는 α -pinene, β -pinene, myrcene, β -phellandrene이 주요하게 나타났고, 금성산 리기다의 경우 β -pinene이 β -phellandrene보다 크게 나타났으며, 지리산 리기다의 경우에는 β -phellandrene이 β -pinene보다 크게 나타나 지역간 차이를 다소간 볼 수 있었다.

침엽수의 수종별 구성물질을 비교해 보았을 때, 금성산 지역에서는 소나무에서 β -phellandrene이 β -pinene보다 상대적으로 많은 양이 배출되었고, 리기다에서는 반대의 경향이 나타났다. 또한 지리산 지역의 두 침엽수에서 α -pinene, myrcene, β -phellandrene이 주요하게 배출되는 것은 유사하였으나, d-limonene의 구성비에서 약간의 차이를 보였다.

침엽수의 모노테르펜 배출속도를 지역간, 수종간으로 연구하였는 바, 소나무는 상관계수(r^2)가 약 0.640으로 두 지역에서 거의 유사하였고, β 값과 ERs는 두 지역에서 큰 차이는 없었으나 지리산에서 다소 높게 나타났다. 리기다는 두 지역에서의 상관계수가 유사하였고, β 값과 ERs는 금성산보다 지리산에서 상대적으로 높게 나타났다.

소나무와 리기다를 비교하였을 때 두 지역 모두에서 소나무의 β 값이 크게 나타나 소나무가 리기다보다 온도에 대한 변화가 좀더 큰 것으로 나타났다. 또한, ERs값에서도 소나무의 경우가 리기다 보다 크게 나타나 소나무가 상대적으로 많은 양의 모노테르펜을 배출하는 것으로 나타났다. 본 연구의 침엽수에 대한 β 값이 타 연구의 소나무와 리기다 값과 상당히 근접한 것을 알 수 있었으나, 절대적인 배출속도 값은 경우에 따라 상당한 차이(2~3배 이상)를 보이는 것으로 나타났다.

부수적으로 침엽수의 배출인자 중에서 토지의 비옥도 등의 환경변수들에 따른 배출속도 차이를 확인하기 위하여 성장환경이 다른 나주지역의 금성산과 제주도에서 자란 소나무를 비교하였다. 그 결과 나주 지역이 제주도에서 채취해온 소나무보다 상대적으로 높게 나타나, 미래에는 지역에 따른 연구도 필요하다는 것을 시사해 주고 있다.

미국의 남부지역에서는 침엽수종 주로 slash pine

과 lablolly pine이 주종을 이루는데 이들은 α , β -pinene이 상당히 많은 양으로 배출된다. 그러나 국내 침엽수종 대부분을 차지하는 소나무에서는 반응성이 3배 가량 높은 myrcene과 β -phellandrene 물질이 많은 양으로 배출되고 있어 국내 광화학 스모그 발생에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 대기화학적 관점에서 볼 때 국내의 대기질 개선을 위해서 국내 수종에 대한 배출속도 뿐만 아니라 모노테르펜의 물질별 배출특성을 연구하는 것도 향후 매우 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다. 본 연구를 수행하는데 도움을 주신 동신대학교 환경조경학과 주명철 교수님께 진심으로 고마움을 전합니다.

참고 문헌

- 대기보전국(2001) 오존 오염의 현황과 대응방안, 환경부.
- 지동영, 김소영, 한진석(2002) 소나무와 잣나무에서 배출되는 주요 테르펜의 배출특성에 관한 비교연구, 한국대기환경학회, 18(6), 515-525.
- 산림청(2001) 임업통계연보.
- Calogirou, A., B.R. Larsen, and D. Kotzias (1999) Gas-phase terpene oxidation products: a review, Atmospheric Environment, 33, 1423-1439.
- Chameides, W.L., R.W. Linsay, J. Richardson, and C.S. Kiang (1988) The role of Biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study. Science 241, 1473-1475.
- Coeur, C., V. Jacob, and P. Foster (1999) Aerosol formation from the gas-phase reaction of hydroxyl radical with the natural hydrocarbon bornyl acetate, Atmospheric Environment, 33, 1615-1620.
- Fehsenfeld, F., J. Calvert, R. Fall, P. Goldan, and A.B. Guenther (1992) Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry. Global Biochemical Cycles, 6, 389-430.
- Guenther, A., N. Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T.

- Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, W.A. Mckay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbretcher, R. Tallamraju, J. Taylor, and P.R. Zimmerman (1995) A global model of natural volatile organic compound emissions. *J. Geophys. Res.* 100, 8873–8892.
- 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.
- Harrison, D., M.C. Hunter, A.C. Lewis, P.W. Seakins, T.W. 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.
- Isebrand, J.G., A.B. Guenther, P. Harley, D. Helmig, L. Klinger, L. Vierling, P. Zimmerman, and C. Geron (1999) Volatile organic compound emission rates from mixed deciduous and coniferous forests in Northern Wisconsin, USA, *Atmospheric Environment*, 33, 2527–2536.
- Kim, J.C. (2001a) Factors controlling natural VOC emissions in a southeastern US pine forest, *Atmospheric Environment*, 35, 3279–3292.
- Kim, J.C. (2001b) Development of a Novel Sampling Technique for Natural VOC emissions, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 17(E2), 61–70.
- 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.
- Komenda, M., E. Parusel, A. Wedel, and R. Koppmann (2001) Measurements of biogenic VOC emissions: sampling, analysis, and calibration, *Atmospheric Environment*, 35, 2069–2080.
- Odum, J., T. Hoffmann, F. Bowman, D. Collins, D. Klockow, R.C. Flagan, and J.H. Seinfeld (1996) Aerosol formation potential of biogenic hydrocarbons, *Journal of Aerosol Science*, 27, S233–S234.
- 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.
- Owen, S.M., C. Boissard, and C.N. Hewitt (2001) Volatile organic compounds (VOCs) emitted from 40 Mediterranean plant species: VOC speciation and extrapolation to habitat scale, *Atmospheric Environment*, 35, 5393–5409.
- Staudt, M., N. Bertin, U. Hansen, G. Seufert, P. Ciccioli, P. Foster, B. Frenzel, J.–L. Fugit, and L. Torres (1997) The BEMA—project: seasonal and diurnal patterns of monoterpene emissions from *Pinus pinea* (L.), *Atmospheric Environment*, 31, 145–156.
- Street, R.A., S. Owen, S.C. Duckham, C. Boissard, and C.N. Hewitt (1997) Effect of habitat and age on variations in volatile organic compound (VOC) emissions from *Quercus ilex* and *Pinus pinea*, *Atmospheric Environment*, 31(SI), 89–100.
- Tani, A., S. Nozoe, M. Aoki, and C.N. Hewitt (2002) Monoterpene fluxes measured above a Japanese red pine forest at Oshiba plateau, Japan, *Atmospheric Environment*, 36, 3391–3402.
- 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 Physiology*, 65, 797–801.
- Yokochi, Y. and Y. Ambe (1984) Factors Affecting the Emission of Monoterpenes from Red Pine (*Pinus densiflora*), *Plant Physiol.* 75, 1,009–1,012.
- Zimmerman, P.R. (1979a) 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).