

## 여름철 참나무속의 이소프렌 배출속도 비교에 관한 연구

### A Comparison Study on Isoprene Emission Rates from Oak Trees in Summer

김초천\* · 김기준 · 홍지형<sup>1)</sup> · 선우 영 · 임수길<sup>2)</sup>  
건국대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>국립환경연구원 대기공학과  
<sup>2)</sup>(사)한국아로마테라피협회  
(2003년 1월 28일 접수, 2003년 12월 20일 채택)

Jo-Chun Kim\*, Ki-Joon Kim, Ji-hyung Hong<sup>1)</sup>, Young Sunwoo and Soo-Gil Lim<sup>2)</sup>  
*Department of Environmental Engineering, Konkuk University*  
<sup>1)</sup>*Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research*  
<sup>2)</sup>*The Korean Aromatherapy Association*  
(Received 28 January 2003, accepted 20 December 2003)

#### Abstract

In order to compare the NVOC (Natural Volatile Organic Compound) emission rates from oak trees, the emission rates of isoprene were quantitatively measured in situ based on tree species and region. As a result, the emission rates from *Quercus serrata* T. were found to be 1000 times greater than those from *Quercus acutissima* C. However, the emission rates at the Chiri and Gumsung mountain sites did not show any significant differences in summer. Cuvette tests using four different oak species also supported that there was a tremendous difference in emission rates between *Quercus serrata* T. and *Quercus acutissima* C. It was found that the emission rates from the trees were highest on the order of *Quercus serrata* T., *Quercus aliena* B., *Quercus acutissima* C. and *Quercus variabilis* B.

**Key words** : Isoprene, Emission rate, *Quercus serrata* Thunberg, *Quercus acutissima* Carruthers

#### 1. 서 론

인간의 활동에 의해 생성되고 배출되는 휘발성유기화합물질(VOC: Volatile Organic Compound)들의 대기화학적 역할과 그 중요성은 최근 많은 나라들에

게 있어 커다란 관심의 대상이 되고 있다(Barbara *et al.*, 1996). VOC는 발생원에 따라 인위적인(anthropogenic) VOC와 자연적인 VOC(NVOC)로 분류된다. NVOC 배출현상은 인위적인 것보다 다소 늦게 인식되어 1970년대부터 나무, 초지 등의 식물류로부터 이소프렌(isoprene), 모노테르펜(monoterpene)류의 화합물이 배출된다는 것과 그들의 광화학 반응성이 매우 크다는 사실이 밝혀지면서 그 중요성이 인

\* Corresponding author  
Tel : +82-(0)11-642-3699, E-mail: jckim@konkuk.ac.kr

식되기 시작하였다 (Dimitriades, 1981). NVOC는 전 지구적 대기화학반응, 광역적 광화학산화제의 형성, 탄소순환의 수지균형, 비도시지역의 산성침적에 기여하는 유기산의 생성 등에 주요한 영향을 끼친다 (Geron *et al.*, 2002; Nunes and Pio, 2001; Trapp *et al.*, 2001; Arey *et al.*, 1995; Pier, 1995; Finlayson-Pitts, 1993). 테르펜이나 이소프렌의 광화학적 반응성은 자동차로부터 배출되는 VOC의 평균값보다 약 3배 이상 크다 (Carter, 1994).

NVOC의 가장 주요한 배출원은 식물이며 (Harrison *et al.*, 2001; Karlik *et al.*, 2001; Harley *et al.*, 1996), 이소프렌, 테르펜, 알코올, 카르보닐화합물, 에스테르 등은 식물에서 발생하는 대표적인 탄화수소화합물들이다. 특히, 이소프렌은 낙엽수림에서 배출되는 주요한 탄화수소로서 NVOC 배출량 중 약 44%를 차지한다 (Trapp *et al.*, 2001; Mueller 1992). 이러한 VOC 성분들의 배출기여도는 식물의 종류와 외부환경조건에 의해서 현저히 변화될 수 있다. 예를 들어, PAR (Photosynthetically Active Radiation)와 온도에 의해서도 그 배출량이 상당수준 변화할 수 있다는 것이 확인되었다 (Arey *et al.*, 1995; Guenther, 1991; Tingey, 1981; Rasmussen, 1973). 미국의 경우 인위적인 VOC의 양은 18 Tg C yr<sup>-1</sup>인 반면, 자연 배출량은 30에서 60 Tg C yr<sup>-1</sup> 정도인 것으로 추정되었다 (Altschuler, 1983). Winer (1983) 등은 NVOC 배출량이 인위적인 것보다 약 4배에서 10배 정도인 것으로 추정하였고, Guenther (1994) 등에 의하면 전지구적 NVOC가 인위적인 것보다 약 7배 이상인 것으로 보고되고 있다. 한편, 우리나라 경우를 살펴볼 때 전국토의 약 65%가 산림으로 이루어져 있다는 사실이 NVOC가 인위적인 VOC의 양을 훨씬 초과할 것이라는 것을 시사하여 주고 있다. 지금까지 NVOC에 대한 정량적인 배출량 산출이 한번도 이루어진 적이 없었던 바, 국내의 광화학스모그 제어정책에 대단한 혼선이 초래되어 온 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 참나무로부터 배출되는 이소프렌의 배출 속도 (Emission Rate: ER)를 비교 연구하였다. 특히 본 연구에서는 광화학 스모그 계절인 여름철에 일부 참나무속 나무들을 대상으로 수종별, 지역별 비교실험을 수행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 수종 선택 및 실험 조건

우리나라 전체 면적은 2001년 현재 9,940,789 ha로 이중에서 산림면적은 약 65%이다. 전체 산림면적에서 활엽수가 차지하는 부분은 약 26%이며, 전국적으로 볼 때 대표적인 수종은 졸참나무 (*Quercus serrata* Thunberg), 상수리나무 (*Quercus acutissima* Caruthers), 굴참나무 (*Quercus variabilis* Blume), 갈참나무 (*Quercus aliena* Blume)이다 (표 1). 본 연구에서는 전남지역 낙엽수의 약 30%를 차지하고 있는 두 수종을 대상으로 배출속도 (ER)를 비교하였다 (산림청, 2001). 특히 Cuvette 실험을 통해서 졸참, 갈참, 굴참, 상수리나무를 대상으로 배출속도를 비교하였다.

나무는 주위 환경에 따라 그 성장에 많은 차이가 있다. 토양의 비옥도, 기후 등 지역에 따라 식생은 서로 다른 성장환경을 겪게 된다. 본 연구에서는 이러한 성장환경에 따른 즉, 지역적인 차이를 알아보기 위하여 일차적으로 남부지역의 두 지역을 선정하여

Table 1. Plantation area and composition ratios of oak trees in land.

Species	Republic of Korea		Jeonnam Province	
	Area (ha)	Ratio (%)	Area (ha)	Ratio (%)
Deciduous Trees	2,507,612		215,859	
<i>Q. aliena</i> B.	106,640	4	16,873	8
<i>Q. variabilis</i> B.	392,612	16	25,019	12
<i>Q. acutissima</i> C.	482,464	19	32,417	15
<i>Q. serrata</i> T.	296,806	12	29,169	14

Source : 산림청 (2001).

Table 2. PAR and temperature conditions.

Region	<i>Q. serrata</i> T.		<i>Q. acutissima</i> C.		
	PAR (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Temperature (°C)	PAR (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Temperature (°C)	
Gumsung Mt. Site	Max.	2,360	35.2	2,024	37.6
	Min.	41	25.3	138	24.5
	Mean	662	29.2	852	32.8
	n	43		32	
Chiri Mt. Site	Max.	2,378	37.2	2,200	40.0
	Min.	74	26.3	209	22.9
	Mean	850	30.6	1,236	33.2
	n	41		17	

연구를 수행하였다. 연구 대상 지역은 전라남도 소재한 금성산 일대 (35°04'N, 126°66'W)와 경상도와 전라도의 중간지점에 위치한 지리산 일대 (35°37'N, 127°52'W)를 대상으로 하였다.

금성산 졸참나무의 경우는 2002년 9월 3일부터 9월 13일 사이에 배출속도 측정이 이루어졌고, 금성산 상수리나무의 경우에는 2002년 9월 11일부터 9월 13일 사이에 측정이 이루어졌다. 지리산 지역은 2002년 8월 28일부터 9월 8일 사이에 측정이 수행되었다.

두 지역에서의 졸참나무와 상수리나무 배출속도 측정시 PAR와 온도의 범위는 표 2에 잘 나타나 있으며, 전체 PAR 범위는  $41 \sim 2,378 (\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$  이었고, 온도 범위는  $22.9 \sim 37.6^\circ\text{C}$  이었다.

각 수종으로부터 발생하는 이소프렌의 양은 단위 시간당 단위 건중량당 발생하는 탄소의 양 ( $\mu\text{gC} \cdot \text{g}^{-1} \text{dw} \cdot \text{hr}^{-1}$ )으로 표현되었고, PAR와 관련 변수 ( $C_L$ )와 온도관련 변수 ( $C_T$ )를 결합한  $C (= C_L \cdot C_T)$ 로 표현되었다 (Simon *et al.*, 2001). 또한, 실험의 결과들은 표준 조건 (온도 :  $30^\circ\text{C}$ , PAR :  $1,000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )의 값인 ERs (Standard Emission Rates)로 나타내었다 (Geron *et al.*, 2002; Owen *et al.*, 2001).

## 2.2 실험 장치

### 2.2.1 Enclosure chamber system

참나무 등의 잎으로부터 배출되는 NVOC 시료를 샘플링하기 위한 방법으로써 semi-static enclosures (Zimmerman *et al.*, 1979a)나 dynamic flow-through chamber (Winer *et al.*, 1983) 등이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 기존 방법의 문제점을 보완한 Kim (2001a)의 enclosure chamber system이 이용되었고, 실험에 앞서 chamber내의 NVOC의 혼합현상과 평형농도에 도달되는 시간을 알아보기 위한 실험이 수행되었다 (Kim, 2001b).

Zero air system (Model 701, API, USA)과 vacuum pump (N035.1.2AN.18, Neuberger, USA)가 사용되었고, 모든 유량은 MFC (Mass Flow Controller, 2000-5CH, GMATE, Germany)를 사용하여 조절하였다.

### 2.2.2 Cuvette system

졸참나무, 상수리나무, 굴참나무, 갈참나무의 네 가지 수종에 대하여 동등한 조건에서 상대적인 배출량

비교가 이루어 질 수 있도록 동일한 조건에서 cuvette test가 수행되었다. 사용된 batch type enclosure chamber방식은 Kim (2001a)의 연구에서 사용한 방식을 이용하되 일부 조정하여 batch 방식으로 응용하였다. Chamber 위쪽과 아래쪽에 밸브를 설치하여 공기세정 (Cleaning)과 시료채취 (Sampling)가 용이하게 이루어지도록 하였다. 이때, 빛은 PAR 발생장치를 이용하여 약  $1700 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  상태에서 연구가 수행되도록 하였고, 온도는 약  $40^\circ\text{C}$ 의 동일한 조건에서 수행되도록 하였다.

## 2.3 샘플링 방법

식생에서 배출되는 NVOC를 효율적으로 샘플링하기 위하여 흡착트랩이 사용되었다. 이때, 시료포집용 흡착트랩은 Tenax TA 110 mg (60/80 mesh, SUPELO, USA)과 Carbotrap<sup>TM</sup> 100 mg (20/40 mesh, SUPELO, USA)을 채운 pyrex tube를 사용하여 제작하였다 (Komenda *et al.*, 2001; Owen *et al.*, 1998; Kesselmeier *et al.*, 1996). 흡착트랩의 이소프렌 회수율은 모든 현장실험 조건 하에서  $94.7\% (\pm 5.1\%, n = 7)$ 로 나타났다.

## 2.4 분석방법

채취된 시료들은 냉동고에 보관 후 48시간 이내에 분석되도록 하였고, 정성분석을 위해서는 Aero-trap 6000과 GC/MSD (HP6890/HP5973, USA) 시스템이 사용되었다. Trap desorber의 열탈착 과정은  $250^\circ\text{C}$ 에서 일정 유량으로 6분간 이루어졌으며,  $-150^\circ\text{C}$ 의 cryo trap에서 초저온 농축되었다.  $190^\circ\text{C}$ 의 transfer line을 통하여 시료가 cryo focus로 이동된 후 GC column으로 최종주입 되었으며, column은 HP-624 capillary ( $60 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm}$ ,  $1.8 \mu\text{m}$ )가 사용되었다. 정량분석을 위해서 정성분석 때와 동일한 자동열탈착 장치가 연결된 GC/FID시스템이 사용되었다. GC/FID column으로는 DB-624 Capillary ( $60 \text{ m} \times 0.53 \text{ mm}$ ,  $3 \mu\text{m}$ )가 사용되었다. 이소프렌의 경우 휘발성이 강하기 때문에 oven의 온도를  $-50^\circ\text{C}$ 까지 감소시켜 peak의 분리가 용이하도록 조절하였고, 최종온도는  $220^\circ\text{C}$ 가 되도록 하여 총분석시간 (run time)을 35분으로 조절하였다. 이소프렌의 검량은 permeation tube를 이용한 dynamic flow 방법을 이용하여 mass 단위로 이루어졌으며, 그 결과 결정계수 ( $r^2$ )가 0.999 이상

인 값을 나타내었다. 검출한계는 3.9 ngC으로 나타났고, 분석의 정밀도(RSD)는 6.7% (n=7)로 나타났다. 신뢰성 있는 자료를 얻기 위하여 샘플링 과정에서 동일한 가지를 대상으로 중복실험(Duplicate sampling)이 수행되었으며, 중복분석 정밀도는 평균 10% 이내로 나타났다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수종에 따른 배출특성

여름철 금성산 졸참나무의 배출속도 측정 결과가 그림 1(a)에 나타나 있다. 졸참나무의 이소프렌 ERs 값은 90.5 ( $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )로 나타났다. 자연을 대상으로 하는 실험임에도 불구하고  $r^2$  값이 0.926으로 나타나 이소프렌 배출량이 온도 및 PAR와 매우 큰 상관성이 있음을 알 수 있었다. PAR와 온도가 이소

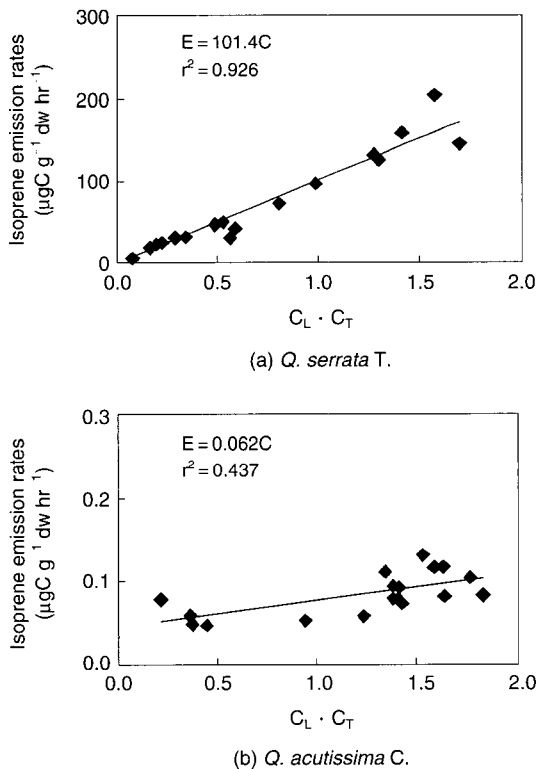


Fig. 1. Variations of isoprene ERs by  $C_L \cdot C_T$  at the Gumsung mountain site in summer.

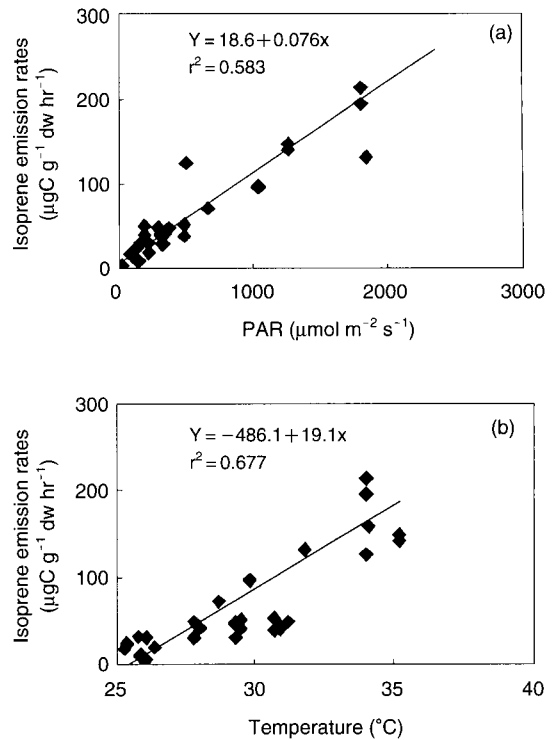


Fig. 2. Variations of isoprene ERs on *Q. serrata* T. by PAR (a) and Temperature (b) at the Gumsung mountain site.

프렌의 배출속도에 큰 영향을 미친다는 사실이 여러 연구에서 보고되고 있는데 본 연구를 통하여 이러한 사실을 확인할 수 있었다(Trapp *et al.*, 2001; Arey *et al.*, 1995; Guenther, 1991; Tingey, 1981; Rasmussen and Jones, 1973). 그림 2에는 PAR와 온도를 분리하여 이소프렌과 배출속도와의 관계를 나타내었다. 이소프렌의 배출속도와 PAR(그림 2(a))의 결정계수는 0.583, 온도(그림 2(b))와의 결정계수는 0.677로 배출속도가  $C_L \cdot C_T$  값과 비교적 큰 상관성이 있음을 알 수 있었다.

그림 1(b)에서 보는 바와 같이 상수리나무의 ERs의 값은 0.062 ( $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )로 나타났고, 상관계수가 0.437로 비교적 낮게 나타나 상수리나무의 경우에는  $C_L \cdot C_T$  값의 변화에 무관하게 ERs 값이 매우 낮았다. 여름철 금성산의 경우 졸참나무와 상수리나무의 ERs 값은 90.5와 0.062로 약 1,500배의 차이를 나타내었다.

줄참나무와 상수리나무는 같은 참나무 속에 속하는 수종들이지만 그 배출특성은 서로 매우 다를 수 있다. 본 연구에서 알 수 있었다. 이러한 결과는 국내에서도 처음으로 수행되었을 뿐만 아니라 전 세계적으로도 처음 보고되는 결과이다. 즉 이러한 사실은 참나무속에서도 각 수종에 따라 배출속도가 대단히 크게 차이가 날 수 있음을 시사하여 주고 있다. 이러한 사실들로 미루어 볼 때, 식생에서 배출되는 NVOC를 좀 더 정확히 측정하기 위해서는 지역 단위나 속 단위의 연구가 아닌 수종별 연구가 우선 강도 높게 수행되어야 할 것으로 사료된다.

3.2 지역에 따른 배출특성

그림 3은 지리산 일대 줄참나무의 배출속도 측정 결과를 나타낸 그래프이다. ERs는 91.4 ( $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )로 나타났고, 결정계수는 0.787로 비교적 높게 나타났다. 그림 4(a)는 여름철 줄참나무의 이소프렌 배출속도를 금성산과 지리산 지점 간의 지역적인 차이로 나타내었다. 금성산 일대 ERs 값은 101.4 ( $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )로 지리산 일대의 91.4 ( $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )와 약 10%의 차이를 나타내었다. 상수리나무의 지역적인 배출속도 차이도 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 약 5%의 차이를 보였다. 줄참나무와 상수리나무 모두 금성산과 지리산의 지역적인 차이는 크지 않는 것으로 나타났다.

3.3 Cuvette 실험에 의한 참나무속의 ERs 비교

그림 5는 참나무 속에 속하는 나무 중 줄참나무,

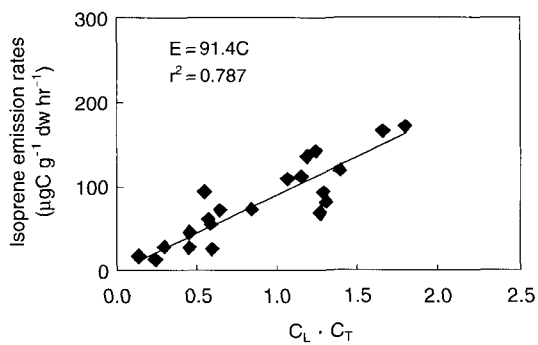


Fig. 3. Variations of isoprene ERs for *Q. acutissima* C. by  $C_L \cdot C_T$  at the Chiri mountain site.

갈참나무, 상수리나무, 굴참나무를 대상으로 Cuvette 실험을 수행한 결과이다. 이러한 Cuvette 실험결과는 Enclosure Chamber 방식에서 측정된 배출속도와 절대적인 비교는 어려우나, 동일한 조건에서 4가지 수

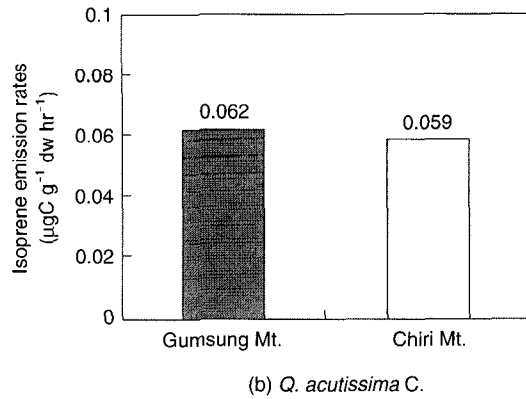
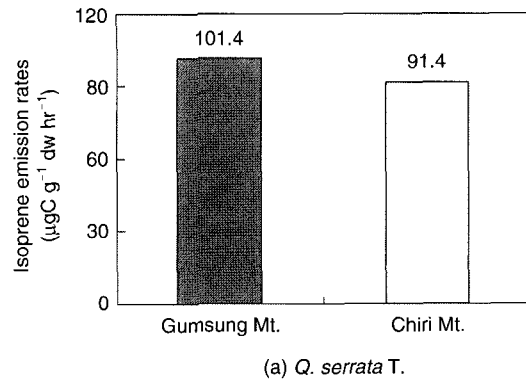


Fig. 4. Regional comparison of isoprene ERs in summer.

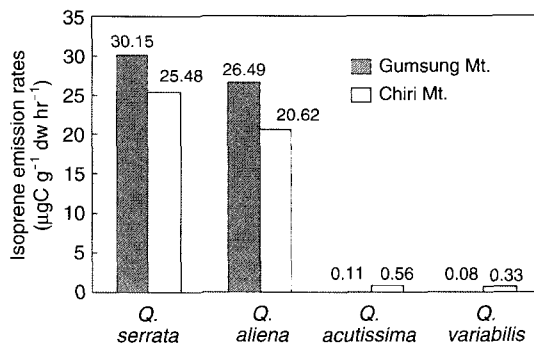


Fig. 5. Regional comparison of isoprene ERs from oak trees by cuvette experiment only.

종을 대상으로 실험이 수행되어 수종간의 상대적인 배출량 차이는 이해할 수 있었다고 사료된다. 그림 5에 나타난 바와 같이 졸참나무의 ERs 값이 가장 높게 나타났으며, 갈참나무도 매우 높게 나타남을 알 수 있었다. 반면에 굴참나무가 가장 낮은 값으로 나타났으며, 상수리나무도 굴참나무와 유사하게 매우 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 졸참나무와 갈참나무는 이소프렌 배출특성이 비슷한 반면 상수리나무와 굴참나무는 이들 나무와 배출특성의 차이가 매우 크게 나타났다.

3. 4 타 연구와의 비교

표 3은 수종은 다르지만 참나무 속에 속하는 나무를 대상으로 연구한 외국의 다른 사례들과 본 연구를 비교한 결과이다. 본 연구의 수종이 외국의 것과는 다르므로 절대적인 비교는 어렵지만 같은 참나무 속에 해당되므로 비교의 의미는 있다고 판단된다. 졸참나무의 경우에는 외국의 일부 사례들과 비슷한 값으로 나타났지만 상수리나무의 경우에는 다른 연구들에서 볼 수 없는 아주 낮은 값을 나타내었다. 이와 같이 상수리나무의 ERs 값이 다른 경우들과 뚜렷이

다르게 나타난 것은 나무의 수종에 따른 생리현상이 매우 다르기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

금성산과 지리산 일대의 졸참나무와 상수리나무에서 발생하는 이소프렌의 배출속도가 현장에서 직접 측정되었고, 서로 다른 4종류의 수종(졸참, 갈참, 상수리, 굴참 나무)에 대하여 cuvette 실험이 수행되었다. 배출속도 비교를 수행한 결과 이들 수종에 대해 다음과 같은 이소프렌 배출특성을 이해할 수 있었다.

1) 수종에 따른 참나무의 이소프렌 배출특성을 비교 고찰한 결과 졸참나무의 배출속도(101.4  $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )가 상수리나무의 배출속도(0.062  $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )보다 1000배 이상 높은 것으로 나타났다.

2) 지역에 따른 참나무의 이소프렌 배출특성을 살펴본 결과 금성산 지역(졸참나무: 101.4  $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ , 상수리나무: 0.062  $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )과 지리산 지역(졸참나무: 91.4  $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ , 상수리나무: 0.059  $\mu\text{gCg}^{-1}\text{dwhr}^{-1}$ )이 서로 큰 차이를 나타내지 않았다.

3) 졸참나무, 갈참나무, 상수리나무, 굴참나무 등 참나무속에 속하는 4종류의 나무를 대상으로 동일한 조건에서 cuvette 실험을 수행한 결과 졸참나무와 갈참나무가 상수리나무나 굴참나무보다 훨씬 높은 이소프렌 배출속도를 나타냄을 확인할 수 있었다.

4) 참나무속에 속하는 나무를 대상으로 연구한 외국의 다른 사례들과 비교해 본 결과, 국내의 졸참나무 경우에는 외국의 일부 사례들과 비슷하였지만, 상수리나무나 굴참나무의 경우에는 다른 연구들에서 볼 수 없는 아주 낮은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 이소프렌 배출속도 연구에서 수종단위의 연구가 지역 단위나 속 단위의 연구보다 중요하다는 것을 암시하여주고 있다.

위의 결론들을 종합해 볼 때 같은 속에서도 수종에 따라서 이소프렌의 배출속도의 차이가 크게 나타나므로 인근 도시지역의 대기오염, 특히 오존과 같은 광화학 대기오염 문제에 기여하는 정도가 많이 다른 것으로 사료된다. 따라서 도시 내·외의 NVOC 배출량 연구는 반드시 수종 단위로 이뤄져야 할 것이다.

Table 3. Comparison of Standard Emission Rates from oak trees between this and other studies.

Species	Researcher	Isoprene ERs*
<i>Quercus acutissima</i> C.	This research (2002)	(0.059~0.062)
<i>Q. serrata</i> T.	This research (2002)	(91.4~101.4)
<i>Q. agrifolia</i>	Winer et al. (1983)	31.1
<i>Q. alba</i>	Kesselmeier et al. (1996)	(15.2~38.7)
<i>Q. chrysolepis</i>	Geron et al. (2002)	92
<i>Q. douglasii</i>	Karlik et al. (2001)	16.7
<i>Q. ilex</i>	Karlik et al. (2001)	23.8
<i>Q. kelloggii</i>	Kesselmeier et al. (1996)	(10.1~15.6)
<i>Q. laevis</i>	Karlik et al. (2001)	47.6
<i>Q. palustris</i>	Geron et al. (2002)	151
<i>Q. phellos</i>	Karlik et al. (2001)	23.8
<i>Q. prinus</i>	Geron et al. (2002)	93
<i>Q. pubescens</i>	Geron et al., (2002)	44
<i>Q. rubra</i>	Owen (2001)	(66~72)
<i>Q. velutina</i>	Kesselmeier et al. (1996)	(37.1~51.5)
<i>Q. virginiana</i>	Geron et al. (2002)	67
	Geron et al. (2002)	157
	Geron et al. (2002)	46

Note : ( ) depicts the range of Isoprene Emission Rates during a certain sampling period.

\* Isoprene ERs in  $\mu\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}\text{dw} \cdot \text{hr}^{-1}$

### 감사의 글

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다.

### 참 고 문 헌

- 산림청, 임업통계연보, 2000.
- Altshuller, A. (1983) Review: Natural volatile organic substances and their effect on air quality in the United States. *Atmospheric Environment*, 17, 2131-2165.
- 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.
- Barbara, Z., C.S. John, H. Gregory, W.G. Alan, and R.P. William (1996) Volatile Organic Compounds up C<sub>20</sub> Emitted from Motor Vehicles; Measurement Methods, *Atmos. Environ.*, 30(12), 2269-2286.
- Dimitriades, B. (1981) The Role of Natural Organics in Photochemical Air Pollution. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 31, 229-235.
- Finlayson-Pitts, B.J. and J.N.N. Pitts (1993) Atmospheric chemistry of tropospheric ozone: scientific and regulatory implications, *J. Air Waste Man. Ass.*, 43, 1091-1100.
- Geron, C., A. Guenther, J. Greenberg, H.W. Loesch, D. Clark, and B. Baker (2002) Biogenic volatile organic compound emissions from a lowland tropical wet forest in Costa Rica, *Atmospheric Environment*, 36, 3793-3802.
- Guenther, A.B. (1991) Isoprene and Monoterpene Emission Rate Variability: Observations With Eucalyptus and Emission Rate Algorithm Development, *Journal of geophysical research*, 96(D6), 10799-10808.
- Guenther, A., P.R. Zimmerman, and M. Wildermuth (1994) Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. woodland landscapes, *Atmospheric Environment*, 32(10), 1825-1833.
- Haggen-Smit, A.J. (1952) Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog, *Indust. Eng. Chem.*, 44, 1342.
- Harley, P., A. Guenther, P.R. Zimmerman, and C. Geron (1996) Effects of light, temperature and canopy position on net photosynthesis and isoprene emission from sweetgum (*Liquidambar styraciflua*) leaves, *Tree Physiology*, 16, 25-32.
- 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.
- Karlik, J.F. and A.M. Winer (2001) Measured isoprene emission rates of plants in California landscapes: comparison to estimates from taxonomic relationships, *Atmospheric Environment*, 35, 1123-1131.
- 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.
- 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.
- Komenda, M., E. Parusel, A. Wedel, and R. Koppmann (2001) Measurements of biogenic VOC emissions: sampling, analysis, and calibration, *Atmospheric Environment*, 35, 2069-2080.
- Mueller, J.F. (1992) Geographical distribution and seasonal variation of surface emissions and deposition velocities of atmospheric trace gases. *Journal of Geophysical Research*, 97, 3787-3804.
- Nunes, T.V. and Pio, C.A. (2001) Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests, *Chemosphere-Global Change Science*, 3, 239-248.
- 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.
- Pier, P.A. (1995) Isoprene emission rates from northern red oak using a whole-tree chamber, *Atmospheric Environment*, 29(12), 1347-1353.
- Rasmussen, R.A. and C.A. Jones (1973) Emission of isoprene

- from leaf discs of Hammameis, *Photochem*, 12, 15-19.
- Simon, V., L. Luchetta, and L. Torres (2001) Estimating the emission of volatile organic Compounds (VOC) from the French forest ecosystem, *Atmospheric Environment*, 35(1), S115-S126.
- 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. Arnts, eds.) Vol. 1, *Emissions*, 53-79.
- Trapp, D., K.M. Cooke, H. Fischer, B. Bonsang, R.U. Zitzelsberger, R. Seuwen, C. Schiller, T. Zenker, U. Parchatka, T.V. Nunes, C.A. Pio, A.C. Lewis, P.W. Seakins, and M.J. Pilling (2001) Isoprene and its degradation products methyl vinyl ketone, methacrolein and formaldehyde in a eucalyptus, *Chemosphere-Global Change Science*, 3, 295-307.
- 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.
- 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).