

## 낙엽수(신갈나무)로부터 배출되는 이소프렌 배출속도 측정 연구

김기준·김조천·임용재<sup>\*</sup>·손윤석·선우영·조규탁<sup>\*\*</sup>  
건국대학교 환경공학과, <sup>\*</sup>국립환경과학원 대기환경과, <sup>\*\*</sup>한국환경기술진흥원  
(2006년 7월 13일 접수; 2007년 1월 22일 채택)

### A Study on the Isoprene Emission Rates from Deciduous Tree(*Quercus Mongolica* Fischer)

Ki-Joon Kim, Jo-Chun Kim, Yong-Jae Lim<sup>\*</sup>, Youn-Suk Son,  
Young Sunwoo and Kyu-Tak Cho<sup>\*\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea  
<sup>\*</sup>Air Quality Division, Environmental Diagnostics Research Department, National Institute of  
Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Environmental Science and Technology, Seoul 122-706, Korea  
(Manuscript received 13 July, 2006; accepted 22 January, 2007)

The standard emission rate(ERs) of isoprene was quantitatively measured in situ from *Quercus mongolica* Fischer that dominates more than about 85% of domestic oak trees. The ERs values in spring and summer were similar to 64.4 and 58.1 ( $\mu\text{gC/gdw/hr}$ ), respectively. The ERs in autumn, 7.06( $\mu\text{gC/gdw/hr}$ ), was about 8~9 times lower than those in spring and summer. The coefficient of determination ( $r^2$ ) between ERs and  $C_L \cdot C_T$  ranged from 0.593 to 0.836. The correlation coefficients between the ERs and PAR, the ER and temperature suggested that ERs have strong correlation with PAR(photosynthetically active radiation) and temperature. In addition, the high values of PAR, temperature, and ERs were found in the time zone of 15:00 ~17:00(spring), 15:00 ~ 16:00(summer), and 14:00 ~ 15:00(autumn).

Key Words : Isoprene, Deciduous tree, ERs, NVOC, PAR

#### 1. 서론

우리나라의 대기 중 오존농도는 해마다 높아져 오존주의보(0.12ppm/시간) 발령일수가 1998년에는 14일간(38회), 1999년에는 16일간(41회), 2000년에는 17일간(52회)으로 증가추세이며, 2001년에는 15일(29회), 2002년에는 9일(45회)을 기록하였다<sup>1)</sup>. 따라서 환경부에서는 대기 중 오존 농도 감소를 위해서 인위적인 휘발성유기화합물(VOCs) 규제 등의 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 상황에서 자연적으로 배출되는 NVOCs(Natural VOCs)는 인위적인 VOCs 배출량을 초과하는 것으로 보고되고 있다<sup>2)</sup>. 현재 식생에서 배출되는 전 지구적 NVOCs 총량은 약 1,150

TgC/yr 로 추정된다<sup>3)</sup>. 자연 배출원에 의해 배출되는 NVOCs는 광화학 반응에 의한 오존 생성에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 왔다<sup>4)</sup>. 특히, 이소프렌(isoprene)은 대기중에 존재하는 탄화수소 중에서 OH 라디칼과의 반응성이 상대적으로 크다. 이러한 이소프렌은  $\text{NO}_x$ 와 광화학 반응 사이클을 통하여 많은 오존을 생성시킨다<sup>5~7)</sup>. 또한, 이소프렌의 광화학 오존생성능력(POCP; Photochemical Ozone Creation Potential) 값은 ethene(ethylene)을 기준물질(POCP = 100)로 볼 때 109.2에 이르러 오존생성의 기여도가 매우 큰 물질이다<sup>8)</sup>.

식생(Vegetation)에서 배출되는 NVOCs 배출량에 대한 과학적인 조사는 1928년 소련에서 시작되었으며, 1950년대에 NVOCs 배출을 측정 자료가 발표되었다<sup>9)</sup>. 1950년대에 북미지역에서는 NVOCs 배출량에 대한 연구가 시작되었으며, NVOCs 배출량이 대

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

기화반응에 주요한 영향을 미칠 수 있다는 제안<sup>10)</sup> 이후 NVOCs의 물질종류, 대기중 거동과 함께 NVOCs의 배출율에 대한 연구가 진행되었다<sup>11~14)</sup>.

일반적으로 식생에서 배출되는 이소프렌은 식생과 주변 환경의 복잡한 상호작용에 의해서 영향을 받는다<sup>15,16)</sup>. 지금까지 알려진 수목에서 배출되는 이소프렌의 영향 인자는 온도, PAR(photosynthetically active radiation), 스트레스, 습도, 계절변화 등에 따른 생리학적인 변동을 들 수 있다. 일반적으로 식물에서 배출되는 이소프렌과 테르펜(terpene)의 양은 모두 온도에 민감한 영향을 받으며, 특히 이소프렌 배출량은 온도뿐만 아니라 PAR에도 강한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이는 일반적으로 이소프렌이 광합성 과정에서 직접적으로 생성되기 때문인 것으로 추정된다. 수종에 따라 차이는 있지만 대부분의 낙엽수의 잎은 이소프렌을 저장하는 저장소를 잎에 가지고 있지 않다. 따라서 이소프렌은 강한 햇빛이 존재하는 낮에 광합성 후 생성되어 대기중으로 배출되는 특성을 갖고 있으며 햇빛이 제공되지 못하면 이소프렌은 생성되지 못하고 몇 분 또는 수 분 내에 배출이 중단된다<sup>17)</sup>.

국내 낙엽수림의 수종별 면적을 살펴보면 상수리나무(22.8%), 신갈나무(18.9%), 굴참나무(18.6%), 졸참나무(14.0%)의 면적이 1,570,983ha로 전체 낙엽수림의 74.3%를 차지하고 있다. 또한, 낙엽수림의 수종별 축적을 볼 때 신갈나무가 전체 낙엽수림의 24.4%로 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 국내 주요 낙엽수림의 수종들은 대부분 아시아 지역에 서식하고 있으므로 국외에서도 이러한 수종들에 대한 NVOC의 배출특성 자료를 찾기가 어렵다. 국내의 정확한 이소프렌 배출량 자료를 축적하기 위해서는 국내 낙엽수림의 주요 수종들에 대한 배출 특성과 배출량에 대한 연구가 필요한 상황이다. 본 연구의 주요 목적은 국내 낙엽수림의 약 85%이상을 차지하는 참나무과 수종 중 신갈나무(*Quercus mongolica* Fischer)를 대상으로 계절에 따른 정량적인 배출속도(Emission rates)를 비교하고, 이소프렌 배출속도에 대한 PAR와 온도의 영향 및 시간에 따른 배출속도를 연구하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구는 2003년도 5월 13일부터 2003년 10월 24일까지 중부지역인 충청북도 남한강유역의 월악산 국립공원 일대에서 수행되었다. 측정이 이루어진 지점들의 TM좌표는 1지점 N 36°50' 58.3", E 128°05' 23.8"과 2지점 N 36°50' 58.3", E 128°05' 25.6"이었다. 이소프렌의 각 계절별 배출속도 측정 기간, 수령, 시료 수, 온도범위, PAR 범위 등이 표 1에 나타나 있다.

신갈나무의 잎에서 직접 배출되는 이소프렌을 측정하기 위하여 가지에 Vegetation Enclosure Chamber (VEC)를 설치하였다. 시스템으로 공급되는 가스는 Zero air system(Model 701, API, USA)에서 발생하는 제로공기(zero air)이었고, 이를 VEC의 유입부에 공급시켰다. 이와 동시에 유출부에서 진공펌프(Neuberger, USA)를 사용하여 유입부와 동일한 유량을 흡입시켜 VEC로 유입, 유출되는 유량이 항상 일정하도록 유지하였다<sup>18)</sup>. 이때, 유량 조절은 Mass Flow Controller(5850E, Brooks Instrument, USA)를 사용하였다. 온도(Envir. Temperature)는 VEC 내에서 직사광선을 받지 않도록 잎의 하단에 온도센서를 부착하여 온도 변화를 확인하였고, PAR 측정장치(BabucM BM-BSR, LSI, Italy)를 설치하여 측정시간 동안의 PAR 변화를 모니터링 하였다. 이때, 잎의 온도와 VEC 내의 온도는 ± 1°C 범위 내에서 일치하였다. NVOCs의 샘플링은 자체 제작한 샘플링장치를 사용하여 수행되었다. 샘플링에 사용된 유량은 50mL/min이었다. 또한, 급격한 PAR나 온도의 변화가 발생할 경우에는 짧은 시간에 샘플링이 이루어 질 수 있도록 폐샘플러(lung sampler)를 이용하여 샘플링을 수행하였다.

채취된 샘플들은 냉동고에 보관하여 실험실로 이송한 후 48시간 이내에 분석되도록 하였고, 정성과 정량분석을 위하여 Aerotrap 6000과 GC/MSD (HP6890/ HP5973, USA), Aerotrap 6000과 GC/FID (HP 5890, USA)시스템이 각각 사용되었다. 이때 사용된 컬럼으로서 HP-624(60m × 0.32mm, 1.8 $\mu$ m)와 DB-624(60m × 0.53mm, 3 $\mu$ m)가 정성과 정량 분석을 위하여 각각 사용되었다.

이소프렌 검량선의 결정계수는 0.999이었고, 검출

Table 1. Details of deciduous trees investigated at the sites of concern

Season	Period (yymmdd)	Tree age	Number of samples	Temperature range(°C)	PAR range ( $\mu$ mol/m <sup>2</sup> /s)
Spring	030513 ~ 030630	2 ~ 5	30	23.0 ~ 41.0	124 ~ 2,320
Summer	030804 ~ 030827	2 ~ 5	33	24.7 ~ 44.5	134 ~ 2,115
Fall	030929 ~ 031024	2 ~ 5	28	15.1 ~ 36.1	69 ~ 1,850

한계(Below Detection Limit, 3 standard deviation)는 0.37ng 이하로 나타났다. 분석 정밀도(Precision)는 10% 이내로 나타났다. 신뢰성 있는 자료를 얻기 위하여 샘플링 과정에서 동일한 가지를 대상으로 중복실험(Duplicate sampling)을 수행한 결과 중복 실험 정밀도는 평균 5%로 나타났다. 또한, 분석과정의 정확도(Accuracy)는 ±10% 이내로 나타났다.

Table 2. Precision estimation by consecutive sampling

Number	Total mass(ng)	Temperature (°C)	PAR (μmol/m <sup>2</sup> /s)	Duplicate precision(%)*
1	1,168.8	28.6	254	8.57
	1,072.8	28.6	254	
2	668.9	36.9	1,055	0.59
	664.9	36.9	1,055	
3	1,833.8	44.5	1,970	3.88
	1,764.0	44.5	1,970	
4	1,532.4	47.1	2,115	7.03
	1,428.3	47.1	2,115	
Mean				5.01

\*Note : Duplicate precision =  $\frac{2|A-B|}{(A+B)} \times 100$

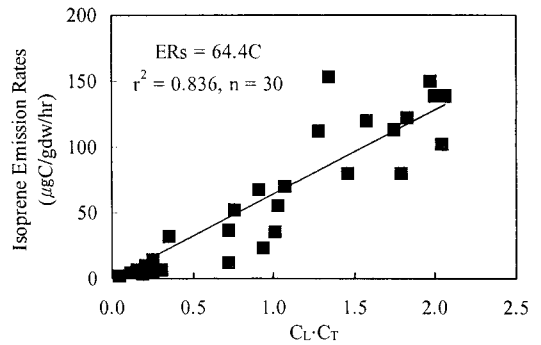
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 이소프렌의 배출 속도

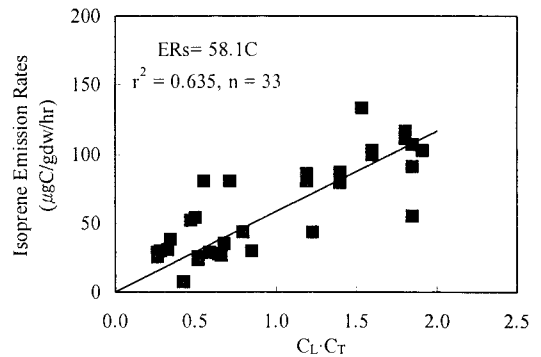
그림 1 (a) ~ 그림 1(c)에는 월악산 지역의 신갈 나무를 대상으로 봄철, 여름철, 가을철의 이소프렌 배출속도 측정 결과가 각각 나타나 있다. 신갈나무의 봄철 실험은 2003년 5월 13일부터 6월 20일 사이에 수행되었으며, 이때 시료 수는 30개에 달하였다. PAR와 온도의 측정범위는 124 ~ 2,320(μmol/m<sup>2</sup>/s)와 23.0 ~ 41.0°C이었다. 신갈나무의 배출속도인 ERs값은 64.4(μgC/gdw/hr)로 나타났고, r<sup>2</sup>값은 0.836으로 나타났다. 여름철 신갈나무의 ERs 값은 58.1(μgC/gdw/hr)로 나타났고, r<sup>2</sup>값은 0.635로 나타났다. 한편 가을철 이소프렌의 ERs 값은 7.06(μgC/gdw/hr)로 나타났고, r<sup>2</sup>값은 0.593으로 나타났다. 여기에서 가을철 신갈나무의 배출속도는 봄철과 여름철의 배출속도 값에 비해 7~8배 정도 낮게 나타나는 것을 관찰 할 수 있었다. 월악산 신갈나무의 봄, 여름, 가을철 배출속도를 비교한 결과 봄철이 여름철의 배출속도보다 다소 높게 나타났고, 가을철의 경우는 봄철과 여름철에 비해 배출속도가 8~9배 정도 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

신갈나무로부터 배출되는 이소프렌 ERs의 계절별 차이를 통계적으로 확인하기 위하여 ANOVA 분

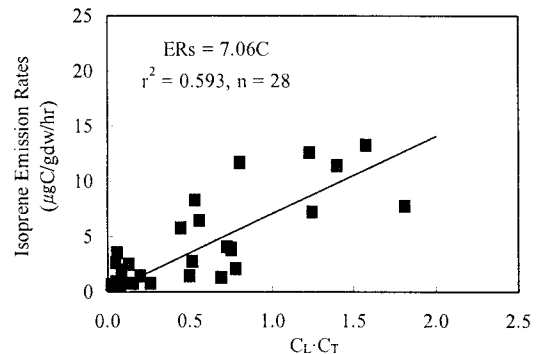
석(H<sub>0</sub>: The 3 population 이소프렌 emission rates are equal)을 수행하였고, 이때 시료수는 27개 이었다. ANOVA 분석 결과(F=23.3, p=0.00000012) 이소프렌의 계절별 차이가 유의한 것으로 확인되었다. 기타 Tukey-Kramer Procedure를 통하여 구체적으로 통계 분석한 결과, 봄철과 여름철의 ERs 값에는 차이가 없는 것으로 나타났으나, 봄철과 가을철, 여름철과 가을철의 이소프렌 ERs 값은 차이가 있는 것으로 확인되었다.



(a) Spring



(b) Summer



(c) Fall

Fig. 1. Variations of isoprene ERs from *Q. mongolica* F. by CL · CT at the Worak site.

그림 1의 계절별 ERs 결과에서 결정계수는 0.593 ~ 0.836 범위로 식생을 대상으로 하는 실험임에도 불구하고 상당히 높은 상관성을 나타내었다. 이와 같이 높은 상관성을 보이는 이유는 신갈나무의 이소프렌 배출특성이 PAR와 온도에 가장 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 신갈나무에서 배출되는 이소프렌의 PAR와 온도에 의한 영향을 분리하여 알아보기 위하여 그림 2와 같이 이소프렌 배출속도를 PAR와 온도에 대하여 각각의 관계 그래프를 작성하였다. 그 결과 봄철 이소프렌 배출속도와 PAR와의 결정계수가 0.658로 나타났고, 이소프렌 배출속도와 온도와의 결정계수는 0.569로 나타났었다. 여기에서  $Cl \cdot C_T$ 와의 결정계수(0.836)보다는 PAR와 온도의 결정계수들이 약간 낮게 나타났으나, 이소프렌의 배출속도는 공통적으로 PAR와 온도에 대하여 각각 상관성이 있는 것으로 확인되었다. 또한, 여름철 결과에서 이소프렌 배출속도와 온도, PAR와의 결정계수 값이 각각 0.673, 0.510으로 나타났고, 가을철 결과에서 온도와 PAR의 결정계수 값이 0.524와 0.539로 나타났었다.

각 계절의 배출속도가 PAR와 온도 두 인자 모두에 상관성이 있는 것으로 판단되어 측정 기간 동안 PAR와 온도만의 상관성을 독립적으로 분석하였다. 상관분석결과 봄철 측정치중 PAR와 온도의 상관계수는 0.853으로 나타났고, 여름철과 가을철의 상관계수는 0.958과 0.863으로 상당히 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났었다.

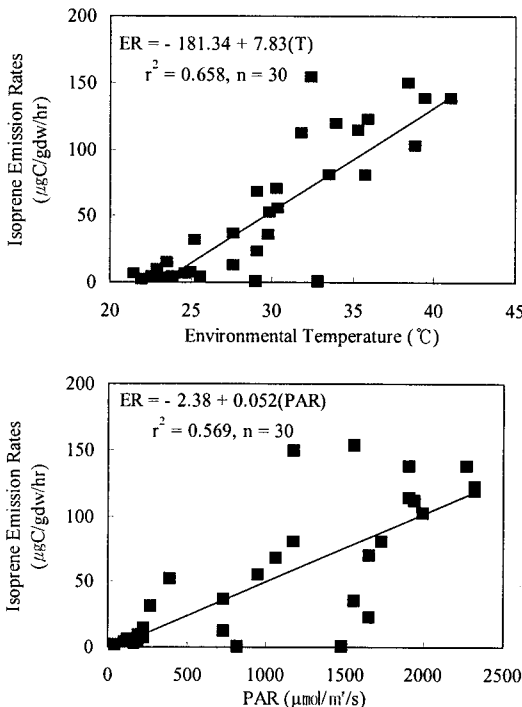
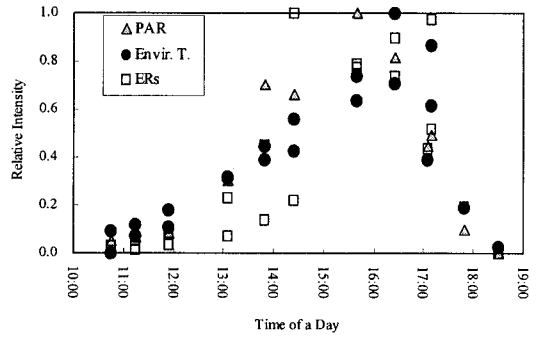


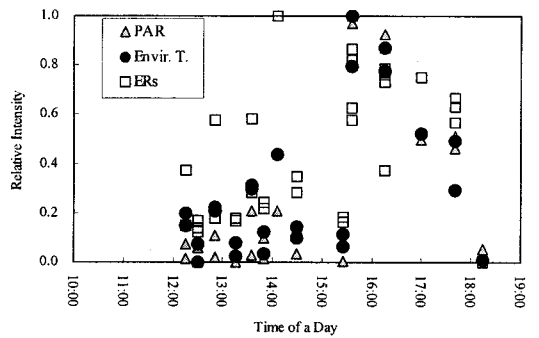
Fig. 2. Variations of isoprene ERs by PAR (a) and Temperature (b) in spring.

그림 3 (a) ~ (c)는 봄철, 여름철, 가을철의 PAR, 온도, ERs의 시간대별 상대적 강도(Relative Intensity, RI)를 나타낸 그래프이다. 상대적 강도는 다음 식(1)에 의하여 계산되었고, 최대값(Max. Value)이 1이 되고 최소값(Min. Value)이 0이 되도록 환산하여 최대값에 대한 상대적인 비율을 나타내었다.

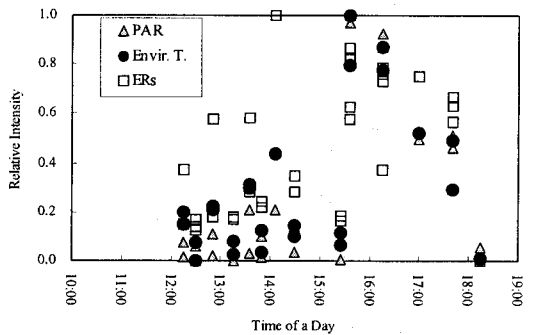
$$Relative\ Intensity = \frac{(i\ Value - Min.\ Value)}{(Max.\ Value - Min.\ Value)} \quad (1)$$



(a) spring



(b) Summer



(c) Fall

Fig. 3. Relative intensities of ERs, PAR, and temperature by time.

그림 3 (a)에는 봄철 신갈나무로부터 배출되는 이소프렌의 상대적 ERs의 강도를 시간대별로 나타내었고, 이와 함께 PAR와 온도의 상대적 강도도 동시에 나타내었다. 시간대 별로 볼 때 12:00부터 증가하여 15:00 ~ 17:00 범위에서 가장 높은 값들을 보였으며, 17:00 이후 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있었다. 특히 온도 및 ERs 값이 PAR와 유사하게 변하는 것을 관측 할 수 있었다. 그림 3 (b)의 여름철 결과에서는 15:00~16:00 시간대에서 가장 높은 값이 나타났으나, 가을철에는 14:00~15:00 사이에 높은 분포를 보여 주었다(그림 3 (c)).

표 3은 참나무(과)에 속하는 수종들을 대상으로 배출속도를 연구한 결과로 본 연구의 결과를 외국의 사례들과 비교한 것이다. 외국의 사례와는 수종이 다르므로 절대적인 비교는 어렵지만 같은 참나무(과)에 포함되는 것이므로 비교의 의미는 있다고 판단된다. 신갈나무의 경우는 외국의 다른 사례들과 비슷한 범주의 값을 나타내었다. 국내 수종에 대한 기존 연구 결과와 비교하면, 신갈나무의 배출속도는 졸참나무의 배출속도보다는 값이 낮은 것으로 나타

났고, 상수리나무의 배출속도와는 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 이와 같이 참나무(과) 수종의 ERs값이 뚜렷이 다르게 나타난 것은 나무의 수종, 수령, 성장조건, 기후, 토질 등에 따른 생리현상이 매우 다르기 때문인 것으로 사료된다. 본 비교 연구를 고찰해 보았을 때 수종에 따른 배출속도의 차이가 다양함을 알 수 있었고, 이는 향후 여러 수종에 대한 배출속도 연구가 매우 의미 있음을 시사해 주고 있다.

#### 4. 결 론

월악산 지역의 신갈나무를 대상으로 봄철, 여름철, 가을철의 이소프렌 배출속도를 측정된 결과, 봄철 ERs값은 64.4( $\mu\text{gC/gdw/hr}$ ), 여름철 ERs 값은 58.1( $\mu\text{gC/gdw/hr}$ ), 가을철 ERs 값은 7.06( $\mu\text{gC/gdw/hr}$ )로 나타났다. 가을철 ERs 값이 8~9배 정도 낮게 나타나는 것을 알 수 있었고, 봄철과 여름철의 ERs 값에는 차이가 없는 것으로 나타났다.

계절별 ERs와  $C_L \cdot C_T$ 의 상관관계에서 결정계수 ( $r^2$ )는 0.593 ~ 0.836 범위로 상당히 높은 값을 나타

Table 3. Comparison of emission rates from oak trees between this and other studies

Species	Researcher	Isoprene ERs* ( $\mu\text{gC/gdw/hr}$ )
<i>Q. mongolica</i> F.	This Research(2003)	(7.06 ~ 64.4)
<i>Q. acutissima</i> C.	Kim et al. (2004) <sup>21)</sup>	(0.059~0.062)
<i>Q. serrata</i> T.	Kim et al. (2004) <sup>21)</sup>	(91.4 ~ 101.4)
<i>Q. aliena</i> G.	Klinger et al.(2002) <sup>20)</sup>	65.5
<i>Q. agrifolia</i>	Winer et al. (1983) <sup>23)</sup>	31.1
	Kesselmeier et al. (1996) <sup>22)</sup>	(15.2 ~ 38.7)
	Geron et al. (2001) <sup>19)</sup>	77
<i>Q. alba</i>	Geron et al. (2001) <sup>19)</sup>	92
<i>Q. chrysolepis</i>	Karlik et al. (2001) <sup>14)</sup>	16.7
<i>Q. douglasii</i>	Karlik et al. (2001) <sup>14)</sup>	23.8
<i>Q. ilex</i>	Kesselmeier et al. (1996) <sup>22)</sup>	(10.1 ~ 15.6)
<i>Q. kelloggii</i>	Karlik et al. (2001) <sup>14)</sup>	47.6
<i>Q. laevis</i>	Geron et al., (2001) <sup>19)</sup>	151
<i>Q. lobata</i>	Korlik et al., (2001) <sup>14)</sup>	20.3
<i>Q. palustris</i>	Karlik et al. (2001) <sup>14)</sup>	23.8
<i>Q. phellos</i>	Geron et al. (2001) <sup>19)</sup>	93
<i>Q. prinus</i>	Geron et al., (2001) <sup>19)</sup>	44
<i>Q. pubescens</i>	Kesselmeier et al. (1996) <sup>22)</sup>	(37.1 ~ 51.5)
	Isebrands et al. (1999)	112
<i>Q. rubra</i>	Geron et al. (2001) <sup>19)</sup>	67
<i>Q. stellata</i>	Geron et al., (2001) <sup>19)</sup>	73
<i>Q. velutina</i>	Geron et al., (2001) <sup>19)</sup>	157

Note : ( ) depicts the range of isoprene Emission Rates  
ERs : Emission rates at 30°C, 1000 $\mu\text{molm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ .

내었고, 배출속도와 PAR, 배출속도와 온도의 상관성을 분리하여 분석한 결과 각각 비교적 높은 상관계수가 나타났다.

봄철, 여름철, 가을철의 PAR, 온도, ERs의 시간대별 상대적 강도를 분석한 결과 3가지 요소 모두 동일한 경향을 보여주었고, 봄철에는 15:00~17:00, 여름철에는 15:00~16:00, 가을철에는 14:00~15:00 시간대에서 높은 분포를 보여주었다.

### 참고문헌

- 1) 환경부, 2003, 대기 환경 연보.
- 2) Guenther A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R. Beron, C. 1995, A global model of natural volatile organic compound emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, 8873-8892.
- 3) Fehsenfeld F., Calvert, J., Fall, R., Goldan, P., Guenther, A. B., 1992, Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry. *Global Biochemical Cycles*, 6, 389-430.
- 4) Chameides W. L., Linsay, R. W., Richardson, J., Kiang, C. S., 1988, The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study, *Science*, 241, 1473-1475.
- 5) Trapp D., Cooke, K. M., Fischer, H., Bonsang, B., Zitzelsberger, R. U., Seuwen, R., Schiller, C., 2001, Isoprene and its degradation products methyl vinyl ketone, methacrolein and formaldehyde in a eucalyptus, *Chemosphere-Global Change Science*, 3, 295-307.
- 6) Nunes, T. V., Pio, C. A., 2001, Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests, *Chemosphere-Global Change Science*, 3, 239-248.
- 7) Geron, C., Guenther, A., Greenberg, J., Loeschner, H.W., Clark, D., Baker, B., 2002, Biogenic volatile organic compound emissions from a lowland tropical wet forest in Costa Rica, *Atmospheric Environment*, 36, 3793-3802.
- 8) Derwent R. G., Jenkin, M. E., Saunders, S. M., Pilling, M. J., 1998, Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in North West Europe calculated with a master chemical mechanism. *Atmospheric Environment*, 32, 2429-2441.
- 9) Isidorov, V., 1993, Volatile emissions of plants: composition, emission rate, and ecological significance, Department of Chemistry, St. Petersburg University, St. Petersburg.
- 10) 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.
- 11) Guenther, A., Zimmerman, P. R., Wildermuth, M., 1994, Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. woodland landscapes, *Atmospheric Environment*, 32(10), 1825-1833.
- 12) Lamb, B., Pierce, T., Baldocchi, D., Allwine, G., Dilts, S., Westberg, H., Geron, C., Guenther, A., Klinger, L., Harley, P., Zimmerman, P. R., 1996, Evaluation of forest canopy models for estimating isoprene emissions. *J. Geophys. Res.*, 101(D17), 22787- 22797
- 13) Benjamin, M. T., Winer, A. M., 1998, Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs, *Atmospheric Environment*, 31(1), 53-68.
- 14) Karlik, J. F., Winer, A. M., 2001, Measured isoprene emission rates of plants in California landscapes: comparison to estimates from taxonomic relationships, *Atmospheric Environment*, 35, 1123-1131.
- 15) Monson, R. K., Lerdau, M. T., Sharkey, T. D., Schimel, D. S., Fall, R., 1995, Biological aspects of constructing volatile organic compound emission inventories, *Atmospheric Environment*, 29(21), 2989-3002.
- 16) Sharkey, T. D., Singaas, E. L., Vanderveer P. J., Geron, C. 1996, Field measurements of isoprene emission from trees in response to temperature and light, *Tree Physiology*, 16, 649-654.
- 17) Guenther, A. B., Monson, R. K. and Fall, R., 1991, Isoprene and Monoterpene emission rate Variability : observation with Eucalyptus and emission rate algorithm development. *J. Geophys. Res.*, D6, 10799-10808.
- 18) Kim, J. C., 2001, Factors controlling natural VOC emissions in a southeastern US pine forest, *Atmospheric Environment*, 35, 3279- 3292.
- 19) Geron, C., Harley, P and Guenther, A., 2001, Isoprene emission capacity for US tree species, *Atmospheric Environment*, 35(19), 3341-3352.

- 20) Klinger, Li, Q. -J., Guenther, J. P., Greenberg, Baker, B. and Bai, J. -H., 2002, Assessment of volatile organo compound emissions from eco-system of china. *Journal of Geophysical Research*, 107(D21), 4603-6424.
- 21) 김조천, 김기준, 홍지형, 선우 영, 임수길, 2004, 여름철 참나무속의 이소프렌 배출특성 비교에 관한 연구, *한국대기환경학회*, 20(1), 111-118.
- 22) 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.
- 23) Winer, A. M., Fitz, D. R. and Miller, P. R., 1983, Investigation of the role of natural hydrocarbons in photochemical smog formation in Calif., Contract #A0-056-32, Air Resour. Board, Scaramento.