

산림지역 이산화탄소 및 자연적휘발성유기화합물의 교환량 관측기법 기초연구

A Preliminary Flux Study for CO₂ and Biogenic VOCs in a Forest

김소영* · 김수연 · 최순호 · 김세웅¹⁾

국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과, ¹⁾미국 국립대기연구소 대기화학부
(2012년 2월 8일 접수, 2012년 4월 10일 수정, 2012년 9월 12일 채택)

So-Young Kim*, Su-Yeon Kim, Soon-Ho Choi and Sae-Wung Kim¹⁾

Department Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research

¹⁾Atmospheric Chemistry Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO USA

(Received 8 February 2012, revised 10 April 2012, accepted 12 September 2012)

Abstract

The purpose of this study is to monitor the flux of CO₂ and BVOCs (biogenic volatile organic compounds) between the atmosphere and forest. The main research activities are conducted at Taehwa Research Forest (TRF), managed by the College of Agriculture and Life Sciences at Seoul National University. The TRF site is located 60 km north-east from the center of Seoul Metropolitan Area. The TRF flux tower is in the middle of a Korean Pine (*Pinus koraiensis*) plantation (400 m × 400 m), surrounded by a mixed forest.

Eddy covariance method was used for CO₂ flux above the forest and REA (Relaxed eddy accumulation) method applying eddy covariance was used for BVOCs flux.

BVOCs flux that was measured in spring (from May 16 to 18) had distribution of 84 to 2917 μg/m² · h. Especially, it showed that d-limonene being strong reactivity composed the largest fraction of monoterpene.

Ambient CO₂ concentration measured in Mt. Taehwa was 399 ppm and observed CO₂ fluxes between the atmosphere and forest suggested that during the day, CO₂ is absorbed by plants through photosynthesis and released during the night.

Key words : CO₂ flux, BVOCs flux, Eddy covariance, Relaxed eddy accumulation, Forest

1. 서 론

IPCC (2007)에 따르면 오존과 CO₂는 지구온도를

상승하는 데 주요한 기여를 하는 물질로 알려져 있다. 오존의 전구물질의 하나인 VOCs (volatile organic compounds; 휘발성유기화합물)는 인위적 배출원뿐만 아니라 산림 등과 같은 자연생태계에서도 많이 배출되고 있다. 특히, 산림에 둘러싸인 미국 대도시 Georgia주 Atlanta의 심각한 오존문제 해결을 위해

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7276, E-mail : air3500@korea.kr

서 BVOCs (biogenic VOCs; 자연적 휘발성유기화합물)의 광화학에 대한 이해가 필요하다는 연구결과 (Chameides *et al.*, 1988) 이후 지난 20년 동안 미국 및 유럽, 일본 등에서는 BVOCs의 배출 및 이의 광화학 연구를 활발히 추진하고 있다. 이는 전 지구적인 관점에서 보았을 때 BVOCs의 배출량이 인위적 기원의 VOCs 배출량의 10배 이상이고 반응성 지표로 보았을 때도 BVOCs의 광화학 반응성이 일반적으로 높기 나타나는 것이 그 이유라고 하겠다 (Benkovitz *et al.*, 2004; Wiedinmyer *et al.*, 2004; Fuentes *et al.*, 2000; Andreae and Crutzen, 1997; Guenther *et al.*, 1995). 우리나라는 전체면적의 약 65%가 산림으로 되어있기 때문에 (산림청, 2003) 광화학에 의한 오존 문제 해결을 위해서는 인위적 VOCs뿐만 아니라 BVOCs에 대한 이해가 반드시 함께 이루어져야 한다.

한편, 전 지구적 기후변화로 오존 문제뿐만 아니라 온실가스 감축의 중요성이 점차 부각되고 있다. 여러 경로를 통하여 배출되는 CO₂, CH₄, N₂O, CFC와 같은 온실가스 중에서 대기 중의 농도는 낮으나 지구온난화에 기여하는 정도가 CO₂에 비해 질량기준으로 21배 정도 높은 CH₄에 대하여 닫힌 플럭스챔버 (closed flux chamber)를 이용한 교환량 측정에 대한 선행연구가 국내에서 이뤄졌으며 (Kim *et al.*, 2000), 84개국 이 서명한 교토협약의 경우 전 지구적 기후변화를 막기 위해 온실가스 중 특히, CO₂ 방출이 심각한 수준으로 이를 감축하되, 생태계에 의해 제거·축적되는 CO₂의 양을 함께 고려하도록 되어있다. 최근 연구결과는 육상생태계가 탄소의 강력한 흡원임을 밝히고 있다 (Goodale *et al.*, 2002; Ciais *et al.*, 1995). 따라서 산림과 같은 육상생태계에 의해 흡수하는 CO₂의 양을 파악한다면 화석연료 사용에 의한 CO₂ 배출량을 정확히 산정할 수 있어 온실가스 감축정책의 주요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

에디공분산 방법은 빠르게 증가하고 있는 대기 중 CO₂ 및 VOCs와 같은 미량기체의 흡원과 발원의 강도, 공간분포 및 탄소순환을 이해하는 데 중요한 기여를 하고 있다. 국내에서는 이 방법을 이용한 농림생태계에서의 온실기체 교환량 관측 기술 개발 (김준, 2011)과 지표와 대기 사이의 상호작용 및 교환량 변화특성 (김현탁 등, 2003) 등의 연구들이 진행되어 왔다.

이러한 이유로 국립환경과학원은 2010년 5월 경기도 광주시 태화산에 대기관측타워를 건립하였다.

대기관측타워를 기반으로 2011년부터 2013년까지 3년에 걸쳐 대기-산림 간 BVOCs와 CO₂의 물질 교환량을 관측하여 산림이 전 지구적 기후변화와 지역 대기질에 어떤 영향을 미치는지 파악하고자 한다.

본 논문은 1차년도 사업 결과로 에디 공분산 방법을 이용한 대기-산림 간 BVOCs와 CO₂의 물질 교환량 측정시스템을 구축하는 것이 주요 내용이며 향후 BVOCs와 CO₂ 교환량 측정결과에 대한 후속 논문을 작성할 계획이다.

2. 연구 방법

2.1 측정지점

대기-산림 간 물질교환량 측정을 위해 서울에서 동북쪽으로 약 60 km 떨어진 경기도 광주시 태화산에 대기관측타워를 설치하였다 (그림 1). 태화산은 해발 644 m로 활엽수림이 전체 산림면적의 60%로 가장 많은 면적을 차지하고 있다. 측정지점은 잣나무 조림지로서 평균 임령은 48년이며, 임목밀도는 433 본/ha이다. 또한 교목 층의 잣나무 평균 흉고직경은 19.1 cm, 최고 42.0 cm, 최저 17.8 cm로 잣나무의 크기가 작고 밀집되어 생육한다. 토양은 유기물이 많은 갈색삼림토로 약산성의 사양토이며 토양밀도는 1.37 g/cm³이다. 그림 1과 같이 태화산 관측 타워는 1.5 × 1.8 m의 구조물로 타워의 높이는 42 m이고 캐노피 높이는 약 18 m이다. 타워 전면은 잣나무로 둘러싸여 있다.

2.2 대기-산림 간 BVOCs 교환량 관측 시스템

대기-산림 간 BVOCs 교환량을 관측하기 위하여 수관의 캐노피 (canopy) 높이 (18 m)보다 조금 높은 23 m에 에디 공분산 방법 (eddy covariance)을 이용한 PTR-MS (proton transfer reaction mass spectrometry) 측정과 REA 시스템 (relaxed eddy accumulation system)을 구축하였다.

일반적으로 에디 공분산 방법은 대기 경계층 내에서 발생하는 난류 물질교환량 (turbulent flux)을 측정하고 계산하는 데 사용되는 유용한 기술로 물질 교환량은 단위시간당 일정한 표면을 통과하는 물질의 양으로 정의된다. 공기흐름은 연직바람 성분을 포함하고 있는 수많은 에디 (eddy; 소용돌이)의 수평흐름

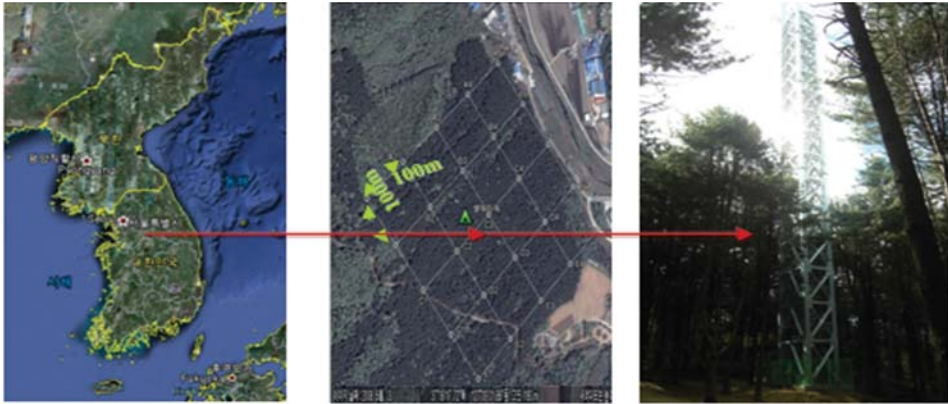


Fig. 1. Monitoring site at Mt. Taehwa (37° 18'19.08"N; 127° 19'07.12"E, 162 m) (Source: google earth; 1.6 × 1.4 km).

으로 볼 수 있는데 이러한 공기흐름의 연직·수평 풍속사이의 공분산과 온·습도와 같은 기상 측정결과를 바탕으로 물질농도에 대한 교환량을 아래와 같이 구할 수 있다(Grabmer *et al.*, 2008).

$$F_s = \overline{w's'}$$

F_s = vertical flux of an atmospheric property

[$\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]

w = vertical wind velocity [m/s]

s = trace gas concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

이와 같은 방법으로 PTR-MS와 에디 공분산 방법을 이용한 BVOCs의 교환량은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다(Karl *et al.*, 2002).

$$F_c = \overline{w'c'} = r_{wc} \cdot \sigma_w \cdot \sigma_c$$

F_c = Flux of an atmospheric property [$\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]

w = vertical wind velocity [m/s]

c = VOC concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

σ_w, σ_c = standard deviation of w and c

r_{wc} = correlation coefficient between w and c

BVOCs 물질교환량 측정의 또 다른 방법인 REA 시스템은 미국국립대기연구소(National Center for Atmospheric Research; NCAR)의 장비를 활용하였다. 23 m (canopy) 높이에 3차원 초음파 풍향풍속계(RM Yong, 81000)와 BVOCs 흡착관 시료채취기를 설치하여 난류를 측정하면서 풍상(upward) 혹은 풍하(down-

ward) 방향의 난류가 불때마다 1회(up & down)당 30분 간격으로 총 3회 연속적으로 흡착관에 공기시료를 누적으로 채취하게 된다(Graus *et al.*, 2006). 채취된 흡착관은 GC/MS를 이용하여 분석하고 아래 수식과 같이 물질교환량을 계산한다.

$$F_i = \sigma_w b (C_{up} - C_{down})$$

$$b = \frac{w'T'}{\sigma_w(T_{up} - T_{down})}$$

여기서, C_{up} 과 C_{down} 은 흡착관에 의해 측정된 각각 화학종의 농도 값, σ_w 은 수직 바람속도의 표준편차, b 는 초음파 풍향·풍속계에 의해 측정되는 연직바람(vertical wind speed; w)과 가온도(virtual temperature; T_v) 측정치에 의해 계산되어 표현된다. 이렇게 관측된 물질교환량 값을 에디 공분산 방식으로 측정된 값과 상호 검증함으로써 정밀한 측정이 이루어질 수 있는 기술적 토대를 마련하려고 하였다.

2.3 대기-산림 간 CO₂ 교환량 관측 시스템

산림에 의한 CO₂의 고정능력을 파악하기 위해 연속적으로 번갈아가면 10 Hz의 속도로 CO₂와 H₂O의 농도를 측정하는 개회로(open path) 기체분석기와 공기 중의 음속을 초음파로 감지하여 풍속을 구하는 3차원 초음파 풍향·풍속계를 이용하였다. 본 연구에 사용된 CO₂ 교환량 측정 시스템은 기체분석기(CO₂/H₂O gas analyzer, LI-7500A)와 3차원 초음파 풍향풍속계(3D sonic anemometer, Campbell Sci., CSAT3)

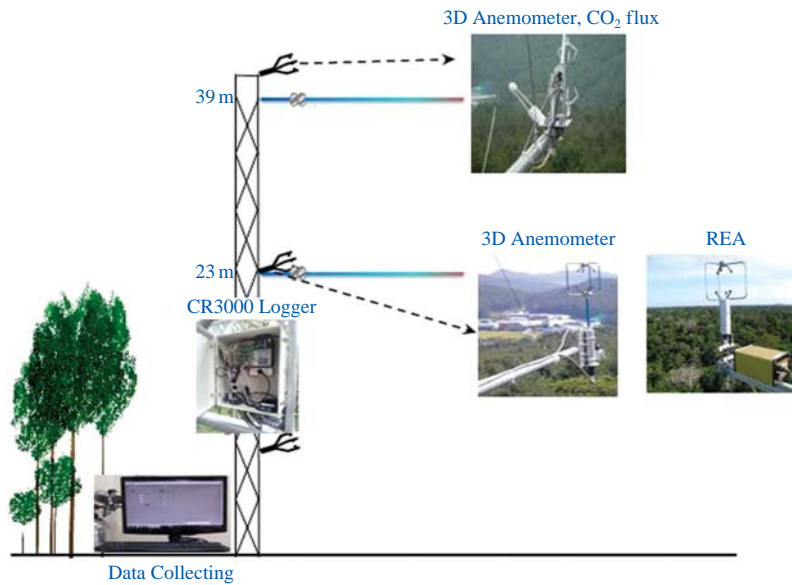


Fig. 2. Establishment of measurement system at Air Monitoring Tower.

Table 1. Measuring equipment system of Air-Monitoring Tower.

Content	Equipment name	Company/Model	Sampling time
VOCs	PTR-MS	IONICON/PTR-MS-HS	10 Hz/s (flexible)
3D anemometer	3-axis Sonic anemometer (23 m, BVOCs Flux)	LSI/DNB046	10 Hz/s
	3D sonic anemometer (40 m, CO ₂ Flux)	Campbell/CSAT3	
	Ultrasonic anemometer (23 m, REA system)	RM Young/model 81000	
CO ₂ , H ₂ O	CO ₂ /H ₂ O gas analyzer	Li-cor/LI-7500	10 Hz/s
Data logger	CO ₂ gas analyzer	Campbell/CR3000	Continuous measurement
	LSI related meteorological data	LSI/E-log	

이다.

대기관측타워 기반 BVOC와 CO₂ 교환량 측정 시스템 구축현황은 그림 2와 같고 표 1은 BVOC와 CO₂ 교환량 관측 시스템 구축 장비 목록을 나타낸 것이다.

에디 공분산 시스템은 대기관측타워 설치 지점의 잣나무뿐 아니라 인근 지역의 도로와 건물 등에서 유래되는 공기에 영향을 받을 수 있기 때문에, 시스템을 설치하기 전에 발자국 분석 (footprint analysis) 을 통해 관측된 CO₂ 교환량이 잣나무에서 발원한 것

임을 확인할 필요가 있다. 발자국 (footprint) 이라고 하는 것은 관측 타워에 설치된 관측 기기가 보고 있는 영역이라고 정의할 수 있다. 즉, 타워의 풍상 (upwind) 측 영역으로 풍하측 (downwind) 영향은 무시할 수 있다. 일반적으로 발자국은 관측 높이, 거칠기 길이 그리고 대기 안정도에 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 발자국 분석을 위해 EdiRe 프로그램 (Version 1.4.3.1021, R. Clement, University of Edinburgh) 을 사용하였다.

EdiRe는 스코틀랜드의 에딘버러 대학에서 개발

된 프로그램이며, 에디 공분산 데이터에 필요한 모든 옵션을 포함하는 완전한 소프트웨어 패키지로 (<http://www.ierm.ed.ac.uk/research/edisol/index.html>) 이미 관측된 높은 빈도의 데이터를 30분 간격의 계산된 데이터로 계산하여 뒤는 자료 제거, 좌표변환, 밀도보정, 교정 등이 가능하게 자료를 처리할 수 있다(Moncrieff *et al.*, 1997).

이와 같은 발자국 분석 이외에도 에디 공분산 방법은 지면 거칠기의 영향을 많이 받는다. 일반적으로 난류에 의한 에너지, 물질 교환이 가장 활발히 일어나는 층을 지표층(surface layer)이라 하며, 지표층은 지표에 매우 인접하여 난류에 의한 공기 섞임이 간헐적으로 생기지 않는 층인 거칠기 저층(roughness sub-layer)과 난류 혼합으로 공기가 잘 섞이는 내부 경계층(internal boundary layer)으로 나눌 수 있다. 에디 공분산 시스템은 에디 공분산 가정을 만족하는 공기 혼합이 잘 일어나는 거칠기 저층 높이 위인 내부 경계층에 설치되어야 한다.

거칠기 저층 높이(z^*)는 지표에서 거칠기를 만들어 내는 물질의 2~5배까지 확장될 수 있는데 태화산 관측지의 z^* 는 최소 36m에서 최대 90m의 범위를 보인다.

z^* 는 영면변이(zero plane displacement, d)와 거칠기 길이(roughness length, z_0)의 합으로 나타낼 수 있으며($z^*=d+10z_0$), z_0 는 아래 식으로 계산된다(Paw

et al., 1989).

$$z_0=(z-d) \exp \left[-\left(\frac{kU}{u^*} + \Psi \right) \right]$$

여기서 z 는 관측 높이, k 는 본 칼만 상수(0.41), U 는 z 에서 관측된 풍속, u^* 는 마찰속도, Ψ 는 통합 안정도 함수(integrated stability function)이다. 대기가 불안정할 때($z/L < 0$), Ψ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\Psi=2 \ln \left[\left(\frac{1+x^2}{2} \right) \right]$$

$$x=(1-16z/L)^{1/4}$$

여기서 Ψ 는 열 이동에 관한 함수이며 z/L 은 상사이론 함수이다. 이에 반해 대기가 안정할 때($z/L > 0$) Ψ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\Psi=-5.2z/L$$

태화산 대기관측타워의 CO₂ 교환량 측정 데이터 중 2011년 9월 12~16일 자료를 사용하여 z^* 를 계산한 결과 z^* 는 대기가 불안정할 때 평균 38.2m, 대기가 안정할 때 평균 63.3m로 나타났다. 이는 40m의 에디 공분산 시스템 높이가 z^* 보다 높은 곳에 설치되어 난류가 잘 혼합되는 곳에 시스템이 설치되어 있음을 보여준다.

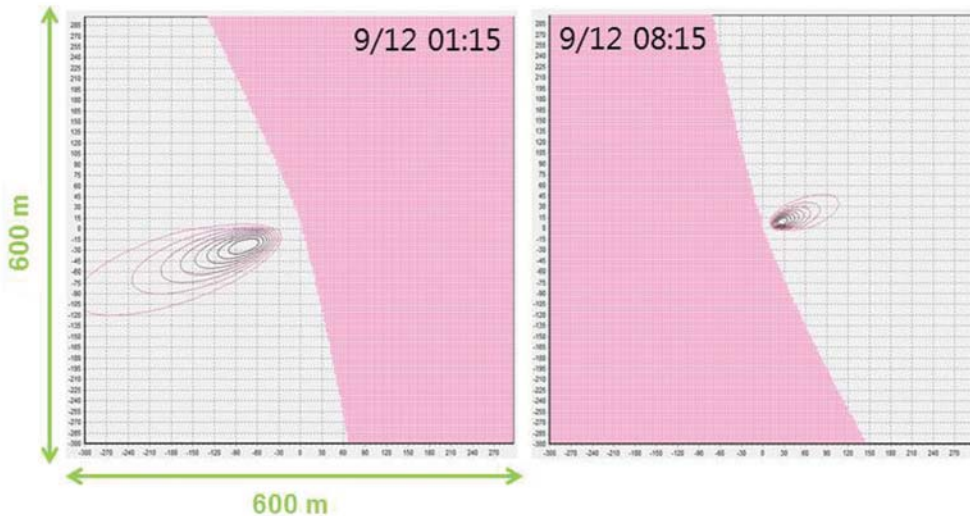


Fig. 3. Footprint of EdiRe program on 40 m (Left: September 12, 2011 01:30, Right: September 12, 2011 08:30).

또한 40m에 설치된 에디 공분산 시스템이 획득하는 CO₂ 교환량 정보에 대한 발자국 분석을 실시하였다. 그림 3은 EdiRe를 사용하여 2011년 9월 12일 원자료로 매 30분마다의 발자국 분석을 실행한 후, 플럭스 발자국의 90% 되는 부분을 표현한 것이다. 한밤인 1시 30분에 대기는 안정하였고 주풍향은 남서쪽(252°)으로 이때 발자국 영역은 남동쪽으로 약 300m이었다. 오전 8시 30분에 대기는 불안정하였으며 이때 주풍향은 북서(70°)이었다. 이때 발자국 영역은 약 100m으로 대기가 안정할 때에 비해 발자국 영역이 3배 정도 줄어들 것을 알 수 있다. 그림 9처럼 에디 공분산 시스템에서 관측되는 CO₂ 교환량 정보는 잣나무에서 발원한 것임을 확인할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 산림지역 기상자료 분석 결과

3.1.1 바람장 분석

태화산에서 5월 1일부터 11월 14일까지 대기관측

타워 40M에서 관측된 자료를 사용하여 그림 4와 같이 30° 별로 나누어 풍향을 분석하였다. 그 결과 관측기간 동안 타워중심으로 전반적으로 골고루 풍향이 분포되어 있었으며 이 중 330~360°의 풍향이 20%로 가장 높은 분포를 보였다. 관측기간 동안 풍속은 0.6~1.2 m/s로 풍향에 따른 풍속의 차이는 두

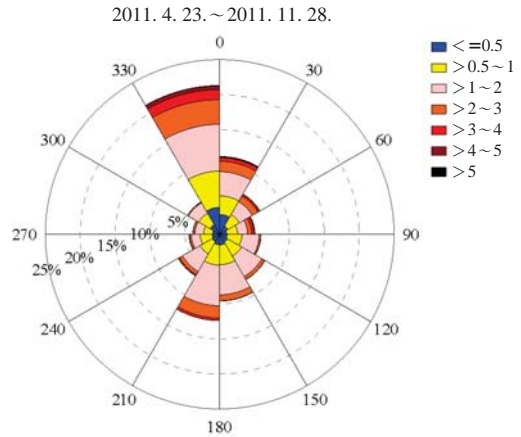


Fig. 4. Wind rose plot observed in tower (40 m).

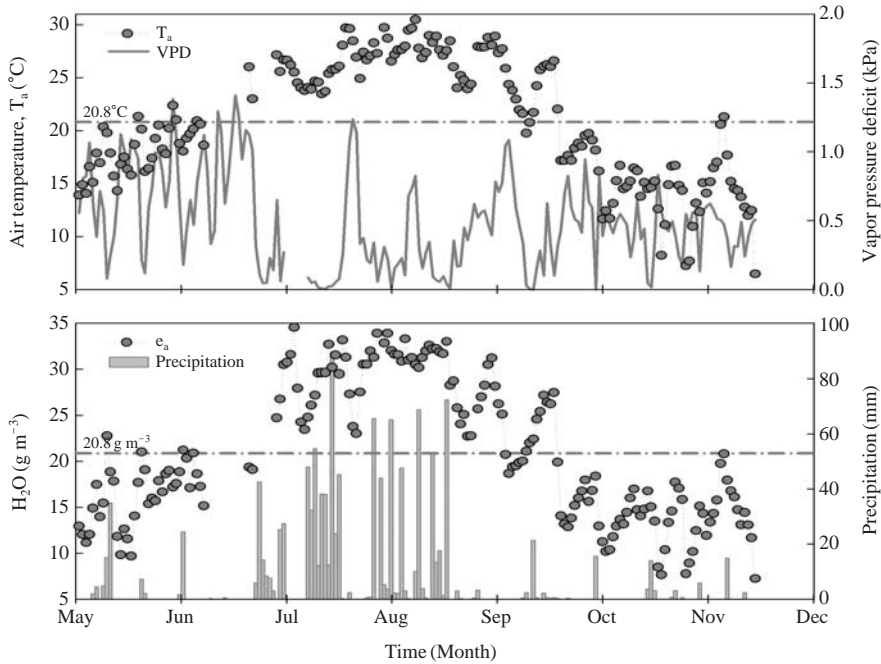


Fig. 5. Diurnal variation of meteorological data (temperature, vapor pressure deficit, vapor concentration, precipitation) from tower.

렸하지 않았으며 평균 풍속은 0.94 ± 0.8 m/s였다. 5~10월 사이에 풍속은 대부분 전 방향으로 평균 1 m/s 이하였다. 예외적으로 9월에 $1 \sim 90^\circ$ 와 $330 \sim 360^\circ$, 10월에 $1 \sim 30^\circ$ 와 $330 \sim 360^\circ$ 에서 1 m/s 이상의 풍속을 보였다.

3.1.2 온도, 포차, 수증기 농도, 강수

관측 기간 동안 일평균 온도, 포차, 수증기 농도와 일적산 강수의 변동을 그림 5에 나타내었다. 일평균 온도는 5월에 12°C 이였으며, 꾸준히 증가하여 8월초에 일최고 31°C 였다. 8월 이후 일평균 온도는 지속적으로 감소하여 10월 말에 일최저 7°C 였다. 2011년은 다른 해와 달리 11월에 이상더위가 10일가량 발생했으며, 특히 11월 1일~10일 사이에 20°C 이상 증가하는 온도변동이 잘 나타났다. 관측 전체기간 동안 일평균 온도는 20.8°C 였다. 일평균 포차는 $0.1 \sim 1.5$ kPa의 변동폭을 보였다. 예상대로 강수가 집중적으로 내리는 장마기간인 6월 중순에서 8월 중순 사이에 대기 중 높은 상대습도로 인해 이 기간의 포차는 다른 기간보다 낮았다. 일평균 수증기 농도는 $7 \sim 35$ g/m³의 변동을 보였다. 강수는 6월 말부터 8월 중순사이에 집중적으로 내렸으며, 관측 기간 동안 총 강수량은 1207.8 mm였다.

3.2 대기-산림 BVOCs의 교환량

국립환경과학원은 대기-산림 간 BVOCs 교환량 관측을 위해 대기관측타워에 PTR-MS와 에디 공분산 시스템과 에디 공분산 방법을 변형한 REA 측정시스템을 구축하였다. 그러나 PTR-MS와 에디 공분산 측정시스템은 아직 측정 결과에 대한 데이터 검증이 이

루어지지 않아 본 논문에서는 REA 시스템을 이용한 BVOCs 교환량 관측방법을 적용하였다. 이를 위해 NCAR의 REA 시스템과 GC/MS를 이용하여 Monoterpene의 종별 물질 교환량을 2011년 5월 16~18일과 9월 16~18일 기간 동안 측정하였다(표 2). 측정 기간 중 9월은 3차원 풍향·풍속계(RM Young)의 이상으로 수직 바람 성분 값이 측정되지 않아 BVOCs의 교환량 값을 구하지 못해 Monoterpene 종별 상대존재비(relative abundance, %)로 나타났다.

봄철(5월 16일~18일) 기간 동안 태화산 잣나무림에서 측정된 BVOC(Monoterpene)의 교환량은 $84.2 \sim 2916.5$ μg/m²·h의 분포를 보이며 다른 물질에 비해 반응성이 강한 d-limonene이 2916.5 μg/m²·h으로 가장 많이 배출되는 것으로 나타났다.

그러나 9월에는 Kim *et al.* (2010)과 같이 a-pinene과 b-pinene이 Monoterpene 중에서 절반 이상을 차지하는 것으로 나타나 이러한 차이가 계절에 따른 일시적인 영향인지 아니면 식물의 생육에 따른 영향인지에 대한 연구를 지속적으로 수행해야 할 것으로 생각된다. 또한 Sesquiterpene의 교환량도 상당히 높게 나타났다는데 BVOCs의 다양한 화학종에 대한 분포가 기간에 따라 상당부분 차이가 나는 것으로 알려져 있으므로(Kim *et al.*, 2010) 장기관측을 통하여 Monoterpene뿐만 아니라 Sesquiterpene의 분포에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.3 대기-산림 CO₂ 교환량

그림 6은 2011년 9월 1일~5일 동안의 CO₂ 교환량과 순복사의 일변동을 나타낸 것이다. 5일 동안 순복사(R_n)는 해가 뜨기 전 음의 값을 보이다가 해가

Table 2. Results of REA system in May and September 2011.

BVOCs	Species	κOH ^a [cm ³ /molecule/s]	Emission [μg/m ² ·h]	Relative abundances (%)		
			Spring 5/16~18	Fall 9/16~18	Summer ^b 8/12~14	Fall ^b 8/18~9/6
Monoterpene (C ₁₀ H ₁₆)	α-pinene	5.3×10^{-11}	274.8	43	—	22
	β-pinene	7.7×10^{-11}	101.8	11	25.1	26
	camphene	5.3×10^{-11}	84.2	18.6	—	—
	d-limonene	1.7×10^{-10}	2916.5	8	15	—
	3-carene	8.7×10^{-11}	—	19.3	17.1	21
Sesquiterpene (C ₁₅ H ₂₄)	longifolene	4.8×10^{-11}	3459	—	—	—

^aRate constants were obtained from Anita *et al.*, 2006

^bIdentified monoterpene relative abundances (12 August to 6 September 2008) from Kim *et al.*, 2010

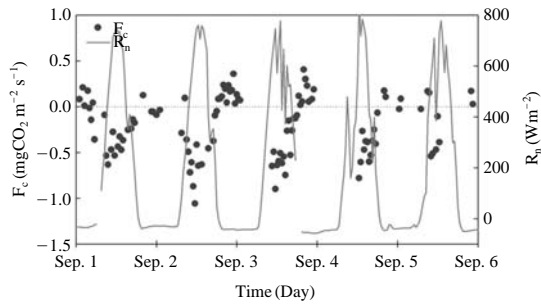


Fig. 6. Diurnal variation of CO₂ flux and net radiation from Mt. Taehwa (Period: september 1 to 31).

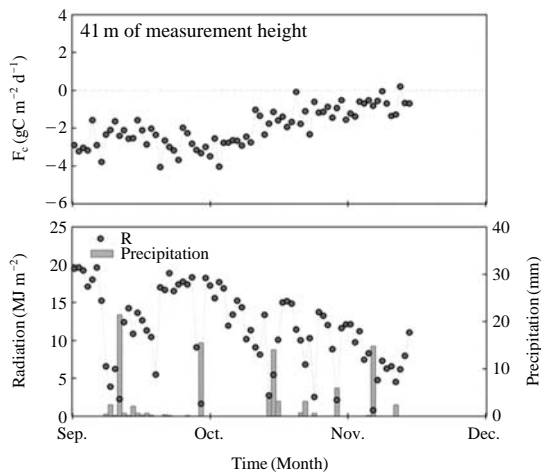


Fig. 7. Diurnal variations of daily cumulative CO₂ flux, daily cumulative net radiation and daily cumulative precipitation (Sep. 1 ~ Nov. 14, 2011).

든 후 양의 값을 보이는 뚜렷한 일변동을 보였다. 태화산 대기관측타워의 낮 시간에 순복사는 최대 800 W/m²를 보였고, 타워 주변의 침엽수림은 해가 뜨기 전 CO₂ 흡원, 해가 진 후 CO₂ 발원으로 뚜렷한 일변동을 나타냈다.

그림 7은 일적산 CO₂ 교환량, 일적산 순복사, 일적산 강수 변동을 나타낸 것으로, 9월 1일~11월 14일 기간 동안 일적산 CO₂ 교환량은 -4.1~0.2 gC/m²/day의 변동을 보였으며, 평균 -1.9 gC/m²/day를 보였다. 9월에 일적산 CO₂ 교환량이 최대 흡원을 보였고 계절이 진행되면서 일적산 CO₂ 교환량이 점차 줄어들어 11월에는 일적산 CO₂ 교환량이 0 gC/m²/day에 가까웠다. 9월 5~15일에 일적산 CO₂ 교환량이

이전보다 감소하였는데, 이는 강수로 인해 복사가 감소하면서 침엽수림의 광합성 효율이 떨어져 일적산 CO₂ 교환량의 흡원정도가 감소한 것으로 판단된다 (약 2.0 gC/m²/day). 9월 15일 이후 강수가 발생하지 않고 복사가 증가하면서 일적산 CO₂ 교환량이 다시 증가하여 약 4.0 gC/m²/day 값을 보였다. 이는 이미 잘 알려져 있듯이 복사가 CO₂ 교환량을 조절하는 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

산림에 의한 전 지구적 기후변화 및 지역대기질 영향여부를 파악하기 위해 본 연구에서는 경기도 광주시 태화산에 대기관측타워를 건립하였고, CO₂ 및 BVOCs 물질교환량 관측 측정시스템을 구축하였다.

우선 대기-산림 간 CO₂ 교환량을 측정하기 위해 공기 혼합이 원활하게 일어나는 내부경계층에 에디 공분산 시스템을 설치하였고, 공분산 가정을 최대한 만족하기 위해 거칠기 저층을 고려하여 적정위치를 초기 23 m에서 40 m로 높여 에디 공분산 시스템을 보정하였다. EdiRe를 사용하여 발자국 분석을 한 결과, 주풍향이 남서서쪽이고 대기가 안정할 때 발자국 영역은 남동쪽으로 약 300 m였고 주풍향이 북서이고 대기가 불안정할 때 발자국 영역은 약 100 m로 나타나 에디 공분산 시스템에서 관측되는 CO₂ 교환량 결과는 측정지점의 잣나무에서 발원한 것임을 확인할 수 있었다. CO₂ 교환량은 주간에 산림의 광합성 작용으로 대기 중 CO₂가 산림으로 흡수되고 야간에는 대기로 방출(산림의 호흡)되는 것으로 나타났다. 이는 태양 순복사 에너지 관계와도 일치하여 순복사량이 많으면 이와 같은 대기-산림 간 교환량이 더욱 확실히 일어나는 것을 알 수 있었으며, 계절에 따라 순복사량이 감소할수록 이들 교환량에도 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

또한 에디 공분산 방법을 변형한 REA 측정시스템을 이용하여 2011년 5월과 9월에 대기-산림 간 BVOCs의 교환량을 측정된 결과 5월에는 Monoterpene 중 d-limonene이 가장 많은 배출량(2916.5 μg/m²·h)을 보였으나 9월에는 이와 달리 a-pinene과 b-pinene의 구성비가 높아 이에 대한 지속적인 관측이 필요할 것으로 생각된다.

또한 Sesquiterpene의 교환량도 상당히 높게 나타났는데 BVOCs의 다양한 화학종에 대한 분포가 기간에 따라 상당부분 차이가 나는 것으로 알려져 있으므로 (Kim *et al.*, 2010) 장기관측을 통하여 Monoterpene뿐만이 아니라 Sesquiterpene의 분포에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

향후 본 연구결과를 토대로 구축된 BVOCs와 CO₂ 교환량 측정시스템을 이용하여 대기-산림 간 BVOCs와 CO₂ 물질교환량에 대한 지속적인 관측과 측정결과에 대한 충분한 정도관리가 필요할 것으로 판단된다. 또한 산림에 의한 전 지구적 기후변화 및 지역 대기질 영향을 파악하기 위해 시간·계절에 따른 물질 교환량을 분석과 대기-산림 간의 에너지 수지에 대한 분석도 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

김 준 (2011) 복잡농림생태계의 온실기체 플럭스 관측, 한국대기환경학회 2011년 춘계학술대회 논문집, p. 419.

김현택, 김연희, 엄향희 (2003) 에디공분산법을 이용한 해남 지표 플럭스 관측, 한국대기환경학회 2003 춘계학술대회 논문집, 415-416.

산림청 (2003) 지역별산림기분통계 (www.foa.go.kr).

Andreae, M.O. and P.J. Crutzen (1997) Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry, *Science*, 276, 1052-1058.

Benkovitz, C.M., S.E. Schwartz, M.P. Jensen, M.A. Miller, R.C. Easter, and T.S. Bates (2004) Modeling atmospheric sulfur over the northern hemisphere during the Aerosol Characterization Experiment 2 experimental period, *J. Geophys. Res.*, 109(34), D22207, doi: 10.1029/2004jd004939.

Chameides, W.L., R.W. Lindsay, 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.

Ciais, P., P.P. Tans, M. Troler, J.W.C. White, and R.J. Francey (1995) A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the 13C/12C ratio of atmospheric CO₂, *Science*, 269 (5527), 1098-1102, DOI: 10.1126/science.269.5227.1098.

Fuentes, J.D., M. Lerdau, R. Atkinson, D. Baldocchi, J.W. Bottenheim, P. Ciccioli, B. Lamb, C. Geron, L. Gu, A. Guenther, T.D. Sharkey, and W. Stockwell (2000)

Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: A review, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 81, 1537-575.

Goodale, C.L., M.J. Apps, R.A. Birdsey, C.B. Field, L.S. Heath, R.A. Houghton, J.C. Jenkins, G.H. Kohlmaier, W. Kurz, S. Liu, G.-J. Nabuurs, S. Nilsson, and A.Z. Shvidenko (2002) Forest carbon sinks in the northern hemisphere, *Ecological Applications*, 12, 891-899.

Gouw, J. and C. Warneke (2007) Measurements of volatile organic compounds in the earth's atmosphere using proton-transfer-reaction mass spectrometry, *Mass Spectrometry Reviews*, 26, 223-257.

Grabmer, M., M. Graus, C. Lindinger, A. Wisthaler, B. Rappengluck, R. Steinbrecher, and A. Hansel (2008) Disjunct eddy covariance measurements of monoterpene fluxes from Norway spruce forest using PTR-MS, *International Journal of Mass Spectrometry*, 239, 111-115.

Graus, M., A. Hansel, A. Wisthaler, C. Lindinger, R. Forkel, K. Hauff, M. Klauer, A. Pfichner, and B. Rappengluck (2006) A relaxed-eddy-accumulation method for the measurement of isoprenoid canopy-fluxes using an online gas-chromatographic technique and PTR-MS simultaneously, *Atmospheric Environment*, 40, S43-S54.

Guenther, A., C.N. Hewitt, D.E. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, M. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor, and P.R. Zimmerman (1995) A global-model of natural volatile organic-compound emissions, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 100, 8873-8892.

IPCC (2007) Climate Change: the Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 135.

Karl, T., C. Spirig, J. Rinne, C. Stroud, P. Prevost, J. Greeberg, R. Fall, and A. Guenther (2002) Virtual disjunct eddy covariance measurements of organic compound fluxes a subalpine forest using proton transfer reaction mass spectrometry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2, 279-291.

Kim, D.-S., Y.-K. Jang, and E.-C. Jeon (2000) Surface flux measurement of methane from landfills by closed chamber technique and its validation, *J. of KOSAE*, 16(5), 499-509. (in Korean with English abstract)

Kim, S., T. Karl, A. Guenther, G. Tyndall, J. Orlando, P. Harley,

- R. Rasmussen, and E. Apel (2010) Emission and ambient distributions of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) in a Ponderosa pine ecosystem: interpretation of PTR-MS mass spectra, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1-14.
- Kyaw, T.P.U. and T.P. Meyers (1989) Investigations with a higher-order canopy turbulence model into mean source-sink levels and bulk canopy resistances, *Agricultural and Forest Meteorology*, 47, 259-271.
- Lee, A., A.H. Goldstein, J.H. Kroll, N.L. Ng, V. Varutbangkul, R.C. Flagan, and J.H. Seinfeld (2006) Gas-phase products and secondary aerosol yields from the photooxidation of 16 different terpenes, *J. Geophys. Res.*, 111, D17305.
- Moncrieff, J.B., J.M. Massheder, H. de Bruin, J. Elbers, T. Friborg, B. Heusinkveld, P. Kabat, S. Scott, H. Soegaard, and A. Verhoef (1997). A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide, *Journal of Hydrology*, 188-189, 589-611.
- White, M.L., R.S. Russo, Y. Zhou, J.L. Ambrose, K. Haase, E.K. Frinak, R.K. Varner, O.W. Wingenter, H. Mao, R. Talbot, and B.C. Sive (2009) Are biogenic emissions a significant 30 source of summertime atmospheric toluene in the rural Northeastern United States, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 81-92.
- Wiedinmyer, C., A. Guenther, P. Harley, N. Hewitt, C. Geron, P. Artaxo, R. Steinbrecher, and R. Rasmussen (2004) Global organic emissions from vegetation, in *Emissions of Atmospheric Trace Compounds*, Edited by C. Granier, P. Artaxo, and C. Reeves, Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers, 115-170.
- Wilson, K., A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. IBrom, B.E. Law, A. Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oechel, J. Tenhunen, R. Valentini, and S. Verma (2002) Energy balance closure at FLUXNET sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223-243.