

## 다중 수증기/이산화탄소 프로파일 관측 시스템의 원리와 활용

유재일 · 이동호\* · 홍진규 · 김 준  
연세대학교 대기과학과/지구환경연구소

(2008년 12월 20일 접수; 2009년 1월 20일 수정; 2009년 1월 30일 수락)

### Principles and Applications of Multi-Level H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> Profile Measurement System

Jaell Yoo, Dongho Lee\*, Jinkyu Hong and Joon Kim

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University/Global Environment Laboratory  
(Received December 20, 2008; Revised January 20, 2009; Accepted January 30, 2009)

#### ABSTRACT

The multi-level profile system is designed to measure the vertical profile of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> concentrations in the surface layer to estimate the storage effects within the plant canopy. It is suitable for long-term experiments and can be used also in advection studies for estimating the spatial variability and vertical gradients in concentration. It enables the user to calculate vertical fluxes of water vapor, CO<sub>2</sub> and other trace gases using the surface layer similarity theory and to infer their sources or sinks. The profile system described in this report includes the following components: sampling system, calibration and flow control system, closed path infrared gas analyzer (IRGA), vacuum pump and a datalogger. The sampling system draws air from 8 inlets into the IRGA in a sequence, so that for 80 seconds air from all levels is measured. The calibration system, controlled by the datalogger, compensates for any deviations in the calibration of the IRGA by using gas sources with known concentrations. The datalogger switches the corresponding valves, measures the linearized voltages from the IRGA, calculates the concentrations for each monitoring level, performs statistical analysis and stores the final data. All critical components are mounted in an environmental enclosure and can operate with little maintenance over long periods of time. This report, as a practical manual, is designed to provide helpful information for those who are interested in using profile system to measure evapotranspiration and net ecosystem exchanges in complex terrain.

*Key words* : Multi-level profile system, H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> concentrations

#### I. 서론 및 이론적 배경

육상 생태계의 증발산 및 순생태 교환량 관측을 위한 첨단 방법으로 에디 공분산 방법을 활용한 플릭스 관측이 광범위하게 이용되고 있다. 에디 공분산 방법을 이용하기 위해서는 기본적으로 기체의 농도를 측정할 수 있는 적외선 기체분석기와 3차원 풍향풍속계로 구성된 에디 공분산 기기를 높은 타워(산림 군림의 높이의 2-3

배)에 설치하여 빠른 시간 간격으로(초당 10-20회) 연직 풍속과 기체 농도의 변동을 측정한다. 이때 기기의 설치 높이가 높을수록, 대기가 안정할수록 보다 넓은 면적의 풍상층 증발산 및 순생태 교환량을 대표할 수 있게 된다. 하지만 에디 공분산 기기들은 지면으로부터 일정한 높이에 설치되어 운영되기 때문에 바람이 약한 기간이나 군락 하부에서 에디 공분산 시스템의 관측 높이 밑에 쌓이거나 없어지는 기체의 양을 측정할 수 없다. 군락이

\* Corresponding Author : Dongho Lee (dlee@ieg.or.kr)

나 지형에 따라 돌풍이 이렇게 쌓여있던 수증기와 이산화탄소를 에디 공분산 시스템 관측 높이까지 도달시키지 않고 측면으로 배출시킬 수 있다. 이런 경우에는 증발량과 순생태교환량이 전혀 측정되지 않거나 일부만 측정될 가능성이 높다. 식생의 키가 낮고 바람이 강한 경우에 이런 효과는 무시될 수 있지만 바람이 약한 산림에서는 그 양이 상당히 클 수 있다.

군락 내부에 측정되는 이러한 기체량의 변화를 저장(또는 저류) 플럭스(*Storage*)라고 하며 이의 측정을 위해서는 기체 농도의 연직 분포를 연속적으로 측정하는 장비가 필요하다. 이러한 장비로부터 측정된 기체 연직 분포의 시간 변화율로부터 저장량을 계산할 수 있다(식 1). 예를 들어 수증기의 경우,

$$\text{Storage} = \int_0^h \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial t} dz \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 군락의 높이,  $\rho_v$ 는 수증기의 농도,  $t$ 는 시간,  $z$ 는 높이를 나타낸다. 만약 이러한 수증기 연직 농도 관측 시스템이 없다면 농도의 시간 변화가 높이에 따라 일정하다는 가정을 통하여 에디 공분산 시스템에서 얻어지는 수증기 농도의 시간 변화율을 계산하여 근사화하기도 한다.

$$\text{Storage} = \int_0^h \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial t} dz \approx h \frac{\Delta \bar{\rho}_v}{\Delta t} \quad (2)$$

결국 저장량의 계산을 위해서는 수증기(또는 이산화탄소) 농도 연직 분포의 시간에 따른 변화 값이 필요하며 이것은 기체 연직 농도 관측 시스템으로부터 관측될 수 있다. 이 항은 바람이 약하고 대기가 안정하며 키가 큰 군락이나 난류가 크게 억제되는 상황 또는 지면과 대기가 분리되어있는 상황에서는 특히 중요하다(Bradford *et al.*, 2001). 하지만 이러한 방법이 최대 50%까지 저장량을 과소평가할 수 있다는 사실에 항상 유의해야 하며(Finnigan, 2006), 특히 일단위 이상 장기간 적산 적분할 경우 이러한 효과가 서로 상쇄되어 무시할 수 있으나 30-60분 정도의 짧은 시간 규모에서는 이러한 효과가 매우 클 수 있기 때문에 무시할 수 없다. 그리고 저장항은 실제로 난류 플럭스에 기여하지는 않지만 빈자료 메우기 방법을 이용하여 최종적인 증발산량이나 순생태교환량을 추정하는 데 있어서는 중요하다.

아울러 저장항뿐만 아니라 연직 이류 효과 또한 증발산과 순생태교환량 추정에 있어서 중요한 역할을 할 수 있다(Hong *et al.*, 2008). 예를 들어, 수증기 농

도의 보존 법칙은 다음과 같이 주어진다.

$$ET = \underbrace{\int_0^h \frac{1}{V} \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial t} dz}_I + \underbrace{\frac{1}{V} (\overline{w' \rho_v'})_h}_II + \underbrace{\int_0^h \frac{1}{V} \bar{w}(z) \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial z} dz}_III + \underbrace{\int_0^h \frac{1}{V} \bar{u}(z) \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial x} dz}_IV \quad (3)$$

여기서  $V$ 는 관측되는 곳의 대표 영역의 체적,  $x$ 는 평균 풍속이 향하는 방향을 나타내며,  $u$ 와  $w$ 는 각각 수평 풍속과 연직 풍속을 나타내고 변수 위에 그어진 선은 시간 평균을 나타낸다. I항이 저장항이며, 연직 이류 효과인 III항은 다음과 같이 재 표현할 수 있다(Lee, 1998).

$$\int_0^h \frac{1}{V} \bar{w}(z) \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial z} dz = \bar{w}(h) \rho_v(h) - \langle \rho_v \rangle \quad (4)$$

여기서  $\langle \rangle$ 는 연직 평균된 수증기 농도를 말하며 따라서 연직 이류효과를 측정하기 위해서도 수증기 농도의 연직 분포가 필요함을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 다중 기체 연직 농도 관측 시스템(이하 “프로파일 시스템”이라 한다)을 이용한 기체 농도의 연직분포 관측은 우리나라와 같은 복잡지형에서 증발산과 순생태 교환량의 정확한 측정을 위해 반드시 필요한 기술이다. 따라서 본 보고서는 그동안 전 세계적으로 특별한 기술적 지침서 없이 개별 연구자들에 의해 구축, 활용되어 온 프로파일 시스템의 활용방법에 대한 상세한 안내서를 목표로 작성되었다. 본 보고서에서 설명하는 프로파일 시스템은 미국 Campbell Scientific Inc.에서 제작하고 현재 연세대 생물기상/생지화학 연구팀에 의해 광릉 관측지에서 이용되고 있는 시스템이다. 전 세계적으로 개별 연구그룹의 목적에 따라 다양한 프로파일 시스템이 구축되어 활용되고 있지만 프로파일 시스템의 기본 구성과 활용방법은 서로 비슷하고 또한 Campbell Scientific Inc.의 시스템이 가장 기술적으로 앞선 시스템이기 때문에 본 보고서는 생태계 증발산 및 수증기 연직 농도분포, 이산화탄소 순생태 교환량 관측을 수행하거나 계획하고 있는 많은 연구자들에게 유용한 기술 지침서의 역할을 수행할 수 있을 것이다.

## II. 프로파일 시스템의 구성

### 2.1. 프로파일 시스템 개요

프로파일시스템은 기본적으로 샘플링시스템, 보정시

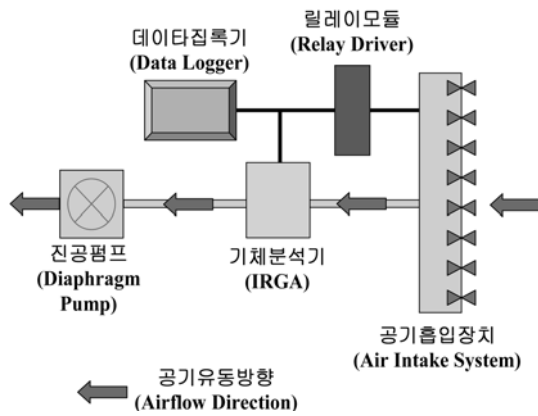


Fig. 1. A Diagram showing the Main Components of Profile System and the Direction of Airflow.

스텝, 기체유동 조절시스템, 폐회로 적외선 기체분석기 (IRGA), 진공펌프 그리고 데이터집록기로 구성된다 (Fig. 1). 샘플링시스템은 서로 다른 높이에 설치된 흡입구를 통해 순차적으로 공기를 흡입해 기체분석기로 보내며, 보정시스템은 농도를 정확히 알고 있는 기체를 이용해 기체분석기의 오차를 보정해 주는 역할을 한다. 데이터 집록기는 밸브를 순차적으로 개폐하여 샘플링 높이와 분석/보정 모드를 선택하고, 기체분석기에서 선택적인 전기신호를 받아들여 각 높이에서의 기체 농도를 계산하며, 통계분석을 실시하며 최종적으로 자료를 저장한다. 이들 모든 구성요소들은 야외 관측 환경에서 장기간의 연속 관측을 안정적으로 수행할 수 있도록 시스템을 안전하게 보호할 수 있는 케이스(또는 시설물) 내에 설치하는 것이 바람직하다(Fig. 2). 본 보고서의 프로파일 시스템 사양은 Appendix에 자세히 설명되어 있다.

### 2.2. 샘플링 시스템

샘플링시스템은 프로파일시스템 본체로부터 각 공기 흡입구까지를 연결하는 튜브와 공기흡입장치로 구성된다. 튜브는 고밀도 폴리에틸렌 외벽과 에틸렌 코폴리머(copolymer)로 코팅된 알루미늄 내벽으로 이루어진 복합 소재로 구성되어 있다. 알루미늄 내벽은 튜브의 벽을 통해 수증기 또는 이산화탄소가 확산되는 것을 방지해 주고, 강성을 갖게 해 튜브가 항상 일정한 직경을 유지할 수 있게 해 준다. 폴리에틸렌 소재는 수증기와 튜브의 벽과의 반응(흡착 등)을 막아준다. 튜브의 길이는 내부 압력을 일정하게 유지하기 위해(농도

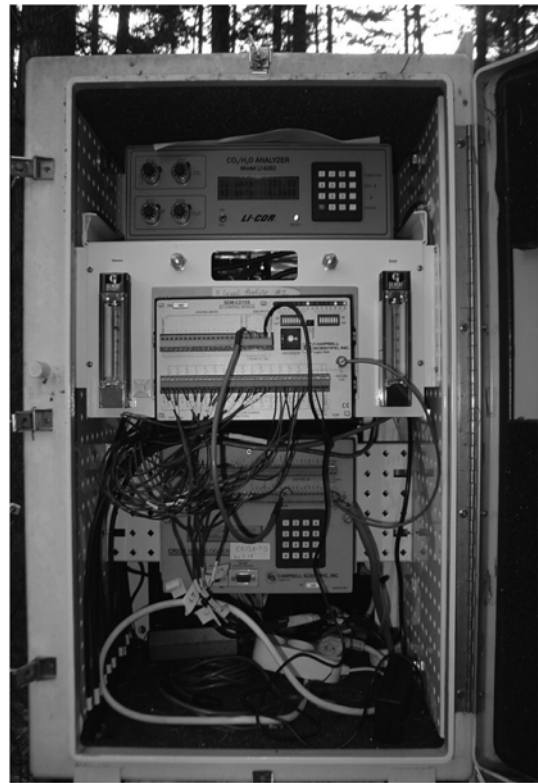


Fig. 2. The Profile System in a Protective Metal Casing installed at Conifer Forest in the Gwangneung Koflux Site.

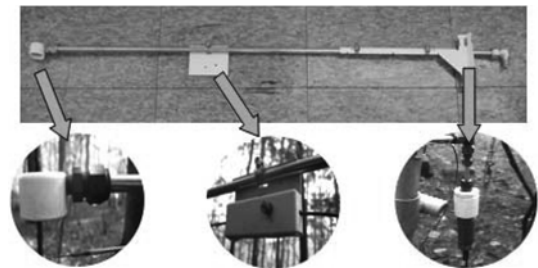


Fig. 3. The Air Intake Assembly.

측정에 미치는 영향을 최소화하기 위해) 샘플링 높이와 관계없이 모두 같아야 한다. 공기흡입장치는 3/8인치의 외경과 0.305인치의 내경을 갖는 1m 길이의 스테인리스 스틸 파이프로 만들어져 있으며(Fig. 3), 공기가 흡입되는 끝부분에는 강수차단부(rain diverter)와 거친(coarse) 필터가 부착되어 있다. 강수차단부는 비가 내릴 때 액체상의 물이 흡입되는 것을 방지해 준다. 공기흡입장치의 반대쪽에는 Swagelok에 의해 연결된 7 $\mu$ m의 필터와 0.016인치의 직경을 갖는 정밀한 유량 조절관이 차례로 놓인다. 조절관을 지나며 기체

의 압력이 감소하기 때문에 단열냉각에 의해 수증기가 응결되는 것을 막기 위해 0.5W 용량의 히터가 설치되어 있다. 정밀 유량조절관은 시스템내의 유량과 압력을 조절하는 역할을 한다.

관의 정확한 크기(직경)는 사용하는 진공펌프의 유형, 샘플링시스템의 직경, 길이 그리고 수를 고려해 시스템내의 압력이 관측지 대기압의 50% 수준을 유지할 수 있도록 결정된다. 이처럼 낮은 압력 하에서는, 수증기와 튜브 벽과의 반응이 작아져 관측 높이를 변경할 때 필요한 안정화 시간을 단축할 수 있다. 시스템을 대기압의 50% 상태에서 운영함으로써 얻어지는 또 다른 장점은 조절관에서의 기체속도가 임계영역(공기의 속도가 음속에 도달하는)에 놓이게 되어 시스템내의 기체량이 펌프의 진공도 변화와 무관하게 일정하게 유지될 수 있다는 점이다. 기체의 이동경로와 기체 분석기의 샘플셀에서의 압력을 낮게 유지함으로써 얻어지는 세 번째 장점은 튜브의 내벽에 생길 수 있는 수증기의 응결현상을 감소시킬 수 있다는 점이다. Dalton의 법칙에 따르면 혼합기체의 압력이 감소하면, 혼합기체를 구성하는 각 성분 기체수증기를 포함하여 의 압력도 비례해서 감소하게 된다. 수증기압이 낮아지면 이슬점 온도도 따라서 낮아지며 이슬점온도가 튜브내의 온도보다 낮아지게 되면 응결현상은 일어나지 않게 된다. 반면에 시스템 내부 압력을 낮게 유지함으로써 발생하는 단점은 농도 측정 시 노이즈가 증가하는 점을 들 수 있다. 다행히, 증가된 진동수 반응에 의해 평형상태에 도달하기 위한 시간은 상당히 감소하게 된다. 이 때문에 각 높이에서의 측정시간이 증가하게 되고 보다 많은 자료가 평균됨에 따라 측정 시 발생하는 노이즈의 영향을 감소시키게 된다.

각각의 공기흡입장치는 튜브를 통해 본체의 자체 제작된 다기관(多岐管, manifold)으로 연결된다. 다기관은 선택된 높이에서 흡입된 공기는 기체분석기로 보내고 동시에 선택되지 않은 높이에서의 공기는 직접 진공펌프(배기구)로 보냄으로써 모든 샘플링 높이에서의 공기가 항상 지속적으로 시스템 내를 흐르도록 만든다. 이와 같은 방식은 시스템이 외부 대기의 변화를 항상 실시간으로 관측할 수 있도록 해 준다. 매순간 선택된 하나의 높이에서 흡입된 공기만이 기체분석기로 보내지고 흡입된 공기의 진행 방향은 다기관의 한쪽 면에 부착된 세 방향 미니어처 솔레노이드 밸브에 의해 조절된다(Fig. 4).

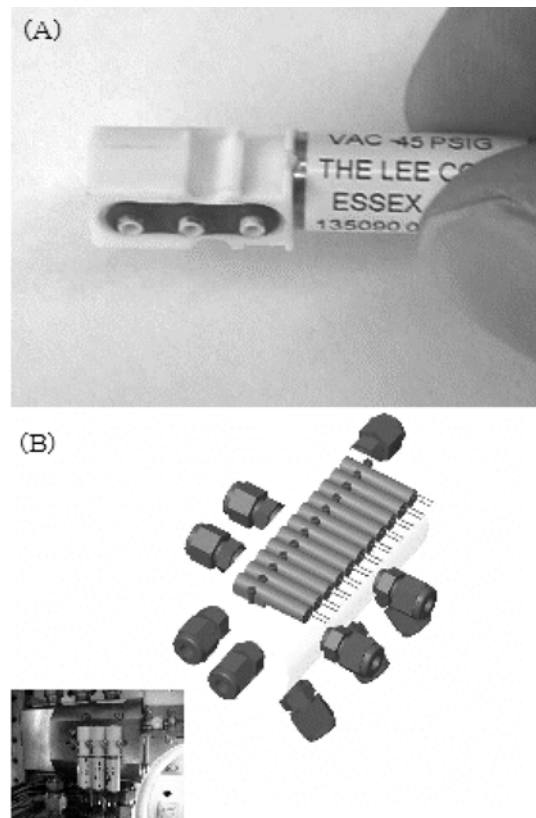
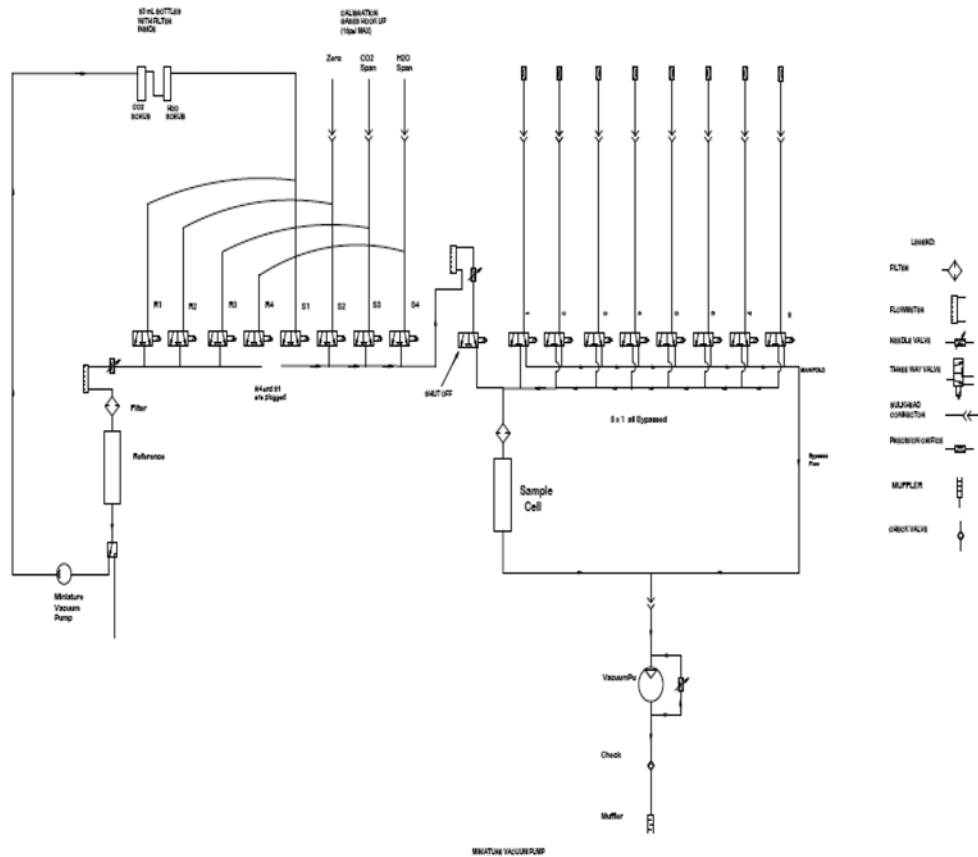


Fig. 4. Miniature Face Mount Solenoid Valve(A) (Lee Co.) and Custom Manifold (B).

각 밸브의 공통 포트는 공기흡입라인에 연결되어 있고 개방포트는 우회라인을 따라 진공펌프로 직접 연결되며 폐쇄포트는 공통라인을 따라 기체분석기의 샘플셀로 연결된다. 미니어처 밸브의 이용은 공통라인의 혼합부피와 인접한 기체 이동통로를 최소화시켜 줌으로써 공기 흡입 높이 변화 후 요구되는 평형 도달시간을 짧게 유지시키고 전체 높이를 측정하는 데 소요되는 순환시간을 빠르게 만들어준다. 예를 들어, 0.016 인치의 직경을 갖는 유량조절관을 이용해 공기 흡입량을 1.3SLPM(Standard Liter Per Minute) 그리고 기체분석기의 샘플셀 내부 압력을 49.26kPa로 유지할 경우, 이산화탄소와 수증기 농도가 서로 다른 공기간의 전환이 일어날 때 99.95%의 안정화가 되는 데 걸리는 시간은 팽릉에 설치된 시스템의 이산화탄소의 경우 6초가 된다. 같은 시간 동안 수증기는 99.4% 안정화가 이루어진다. 전체 높이에 대한 분석을 완료하는 데 걸리는 시간을 줄일 경우 기체분석기의 표류 편차(drift)에 의한 오차를 최소화할 수 있고



**Fig. 5.** The Schematic of Valve Switching and On/Off System (from 8 Level CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O Profile System Operation Manual, Campbell Scientific Inc., USA).

대기 중 이산화탄소와 수증기의 농도 변화를 보다 잘 관찰할 수 있다. 전환된 새로운 높이에서 기체의 농도가 안정화되는 데 걸리는 시간을 줄이게 되면 설정된 시간(사용 중인 시스템의 경우 10초)동안 보다 많은 측정이 가능해져 시그널 대비 노이즈 비를 향상시켜 시스템의 해상도를 높이게 된다. 예를 들어, 0.06 μmol/mol의 미세한 이산화탄소 농도 변화를 측정하는 것이 가능하다.

### 2.3. 보정 및 기체유동 조절 시스템

보정시스템의 목적은 온도, 광학 경로나 광원의 오염, 탐지부의 노후화 등에 의해 야기되는 편차나 출력값의 변화를 보상해 주기 위함이다. 보정시스템은 사용자가 임의로 설정한 시간 간격으로 세 가지 보정기체(이산화탄소를 함유하지 않은 건조 기체(제로보정기체), 표준(수증기, 이산화탄소)농도 기체)를 자동으로 기체분석기의 샘플셀에 흘려 보내주는 기능을 한다. 프로

파일 시스템의 적외선 기체분석기는 절대(absolute) 모드에서 작동되기 때문에 기준(reference)셀은 수증기/이산화탄소 제거용 화학 필터나 제로보정기체에 연결할 수 있다. 이와 같은 방식을 통해 사용자는 주기적으로 화학 필터가 포화되었는지 또는 교체해야 하는지의 여부를 확인할 수 있다. 편의를 위해, 각각 Decarbite® (이산화탄소 제거용)과 Drierite®(수증기 제거용)로 채워진 두 개의 500ml 용량의 폴리카보네이트(polycarbonate) 용기가 연속적으로 연결되어 시스템의 일상적인 운영이나 보정 시에 제로기체를 공급해준다. 보정 시스템은 샘플링시스템에 이용되는 것과 동일한 다섯 개의 미니어처 밸브로 구성되어 샘플링시스템과 함께 다기관면의 한쪽 면에 설치되어 있다(Fig. 5). 이 중 세 개의 밸브는 선택장치(selector) 회로를 구성하는데 닫힌 상태로 대기하는 포트는 각각의 보정기체용기와 연결되어 있고 공통 포트는 모두 상호 연결되어 있다. 다섯 개 중 하나의 밸브는 개폐밸브로서 일상적인 측

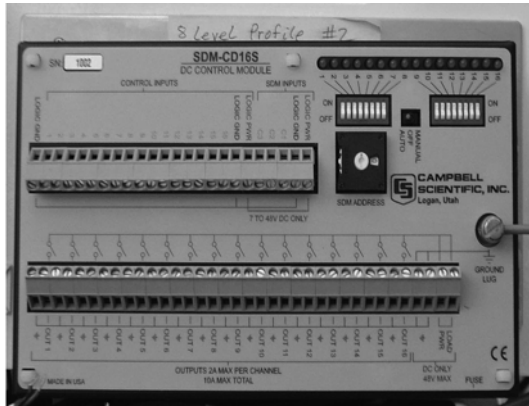


Fig. 6. SDM CD16S Flow Control Module.

정 모드에서는 보정시스템을 샘플링시스템으로부터 분리해주는 역할을 한다. 다섯 번째 밸브는 기체를 기준 셀로 보내주는 역할을 한다. 이 밸브의 열린 포트는 제거용 화학필터로 그리고 닫힌 포트는 제로보정기체에 연결되어 있다.

보정과 샘플링에 이용되는 모든 밸브는 데이터 집록기의 컨트롤 포트에 연결된 SDM CD16S 릴레이 모듈에 의해 조정된다(Fig. 6). 릴레이 모듈에는 초기 설정이나 문제 해결을 위해 수동 작동 스위치가 설치되어 있는데 특정한 샘플링 높이에 고정시키거나 적절한 밸브의 개폐를 통해 보정기체를 기체분석기의 샘플 셀에 흘려보내기 위해 이용할 수 있다. 14번 스위치는 제로기체를 선택하기 위해 이용하고 16번 스위치는 폐쇄회로 펌프를 조작하기 위해 이용한다. “ON”은 기체제거용 화학필터와 폐쇄회로를 이용할 경우 그리고 “OFF”는 폐쇄회로를 사용하지 않고 제로보정기체를 이용할 경우를 지시한다. 보정기체의 낭비를 막기 위해, 일상적인 분석모드에서는 개폐밸브(9번)가 활성화되지 않는다. 개폐밸브는 다른 모든 샘플링밸브가 비활성화 된 보정모드에서만 열리게 된다. 이 경우 대기는 여전히 모든 높이에서 흡입되지만 바로 진공펌프를 향해 보내지고, 한 가지 보정기체만이 개폐밸브를 통해 기체분석기의 샘플셀로 보내진다. 이와 같은 방식 하에서는 시스템 내부압력이 샘플분석 모드와 보정 모드 모두에서 동일하게 유지될 수 있다.

#### 2.4. 적외선 기체분석기

적외선 기체분석기는 대기 중 수증기(또는 이산화탄소)의 농도를 측정하는 기기로서 Campbell 사의 프로

파일 시스템은 미국 Licor사에서 제작한 LI-6262나 LI-7000 등을 사용한다. 기체분석기는 프로파일 시스템의 폐쇄회로를 이용하여 절대 모드로 운영되고 측정된 전기적 신호는 데이터 집록기에 보내져 보정에 의해 지속적으로 변화되는 변수와 관계식을 이용해 농도를 계산하게 된다. 사용하는 모든 기체분석기에는 압력변환기가 설치되어 샘플셀의 압력을 측정하는데, 이는 측정된 농도에 영향 미치는 압력의 변화를 상시 보정해 주기 위해서이다.

#### 2.5. 데이터 집록기

데이터 집록기는 기체분석기에서 전송된 자료를 가공/저장하고 시스템의 작동을 조정하는 역할을 한다. Campbell사에서 제작한 프로파일 시스템은 자사의 CR23X-TD와 CR3000 등의 데이터 집록기를 사용하며, 현재 본 연구팀에서 운영하는 시스템은 이 중 CR23X-TD를 사용한다. CR23X-TD 데이터 집록기는 기체분석기의 선형화된 출력값(수증기/이산화탄소 농도, 샘플셀의 온도와 압력)을 250milliseconds 간격으로 측정하고, 솔레노이드 밸브를 조정하고, 각 측정높이에서의 평균값을 30분 간격으로 계산하며, 자료를 메모리에 저장한다. 매 30분의 평균 시간에 대해 데이터 집록기는 수증기와 이산화탄소 농도 변화의 기울기를 최소제곱법 선형회귀(least square linear fit)방법에 의해 계산하는데, 이는 서로 다른 높이에서의 농도가 각기 다른 시간에 측정되는 현상에 의한 오차를 보정해 주는 역할을 한다.

측정 시간, 순서 그리고 밸브의 전환은 데이터 집록기에 의해 이루어지는데, 측정상황에 따라 사용자에 의해 수정이 가능하다. 제작자에 의해 설정된 조건은, 밸브가 매 10초마다 새로운 높이로 순서대로 전환되어(즉, 10초간 같은 높이를 측정함) 전체 높이(8개)를 모두 측정하는데 80초의 시간이 소요된다. 위에서 언급한 것처럼 밸브가 새로운 높이로 전환되면 약 6초간의 안정화 시간이 소요되는데 이 기간의 자료는 버려진다. 안정화 시간이 지나면 4초간 측정이 이루어지고 측정값의 평균이 계산된다. 앞에 언급한 안정화 시간과 측정시간은 특정한 측정조건(기체 유동속도 1.3 SLPM, 샘플셀의 압력 49kPa, 다기관(manifold)과 기체분석기를 연결하는 튜브의 크기와 길이 등)에 적합하도록 설정되었기 때문에 이러한 조건이 변화하게 되면 재설정하여야 한다.

측정의 정확도를 향상시키고 계통(systematic) 오차가 발생하는 것을 최소화하기 위해 관측 높이는 1, 3, 5, 7, 8, 6, 4, 2의 순서를 따른다. 이러한 순서는 연속된 두 높이의 차이(기체의 수증기/이산화탄소 농도)를 최소화할 수 있어 이전 높이의 기체에 의해 발생할 수 있는 기억효과(memory effect)를 효과적으로 제거하는 데 도움이 된다. 매 24시간(사용자 지정에 따라 다름)마다 데이터 집록기는 샘플셀에 5분간에 걸쳐 제로기체를 투입해 수증기와 이산화탄소 제로값의 편차를 측정하고 이후 표준 이산화탄소 농도기체를 5분간 투입해 농도를 측정한 후 표준 농도와의 차이를 자동으로 계산한다. 이러한 보정 과정에 의해 새로운 보정 변수들이 데이터 집록기에 입력되어 다음 자동 보정 이전까지의 측정값에 반영된다. 수증기 표준농도 측정과 보정은 이슬점 생성기를 이용하여 수동으로 이루어진다.

## 2.6. 보조장치

시스템내로 유입되는 모든 기체는, 위치와 시간에 관계없이, 반드시 적절한 필터링을 거쳐야 한다. 오염 물질이 유입될 경우, 측정값의 편차발생, 기체분석기의 오작동, 주파수 반응의 감소, 진공펌프의 고장 등을 야기할 수 있다. 따라서 시스템을 작동하기 전에 각 필터가 정확한 위치에 정확하게 설치되었는지 그리고 기체의 유동방향에 일치하는지를 반드시 확인하여야 한다. 각 공기흡입장치에는 7 $\mu$ m의 공극을 갖는 직렬 필터가 장착되어 있다(Fig. 7).

### 2.6.1. 필터

기체 제거용 화학필터용기로 유입되는 공기가 통과하는 라인을 보호하기 위해 ACRO50 직렬필터가 이용된다. 총 세 개의 일회용 카트리지 필터가 이용되는데, 하나는 샘플셀로 들어가는 곳에, 다른 하나는 기준셀로 들어가는 곳에, 그리고 마지막은 제거용 필터 용기에서 나오는 곳에 설치된다. 이들 필터는 50mm

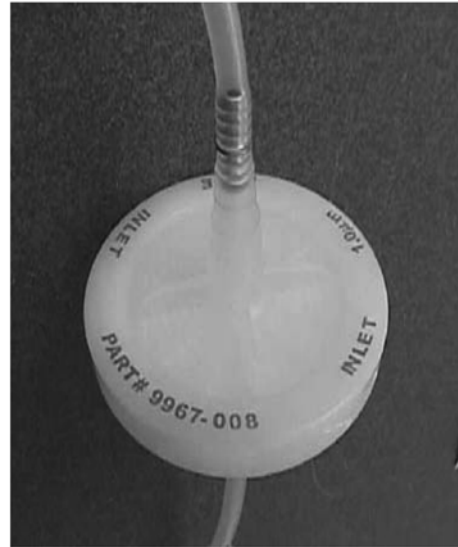


Fig. 8. Disposable Polypropylene Cartridge Filter with 1 $\mu$ m Pore Size PTFE Filter Element.

의 직경과 1 $\mu$ m의 공극을 갖는데 튜브와 barb fitting에 의해 연결된다(Fig. 8).

### 2.6.2. 진공펌프

진공펌프는 시스템의 공기흡입장치로부터 배기장치까지 안정된 공기흐름을 형성하고 내부압력을 조절한다. 장시간, 야외에서 작동되는 특성을 고려해 회전부위가 적고 윤활유를 필요로 하지 않는 내구성 있는 진동판(diaphragm) 펌프를 사용한다. 펌프는 반드시 평탄하고 단단한 면위에 설치하여 진동과 소음을 줄인다. 비와 직달일사를 피할 수 있으면서 동시에 환기가 잘 되는 곳에 설치하여 여름철에 과열되는 것을 막는다. 진공펌프의 톱니모양 연결부에 시스템의 배기부로 통하는 0.5inch 직경의 폴리에틸렌 튜브를 연결한다. 연장된 폴리에틸렌 튜브는 시스템내의 급격한 압력변화를 방지하는 완충기(buffer)의 역할을 하기 때문에 자르지 않고 시스템과 함께 제공된 전체 길이를 모두



Fig. 7. Swagelok® Inline Filter Holder with 7 $\mu$ m Sintered Stainless Steel Filter.

사용한다. 펌프로 공급되는 전원에는 과부하 차단장치가 설치되어야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 시스템 내부의 압력은 대기압의 50%로 유지되어야 한다. 이를 위해 진공펌프 연결부위에 있는 니들밸브를 시계반대방향(증가시킬 때)이나 시계방향(감소시킬 때)으로 돌려 압력을 조절한다. 시스템 내에서 공기의 유동량은 관측지의 대기압에 따라 1.1~1.4SLPM 사이의 값을 갖는다. 이때 각 공기흡입장치에서 측정된 공기 유동량은 모두 오차범위내에서 동일하여야 한다.

### 2.6.3. 보정기체

이산화탄소를 포함하지 않은 건조 압축 기체가 기체 분석기의 제로 핀치를 측정하기 위해 필요하다(제로농도기체). 즉 동일한 제로기체를 기체분석기의 양쪽 셀로 흘려보내게 될 경우 '0' ppm의 값이 측정되어야 하는데 다른 값을 보일 경우 차이를 보정해야 한다. 이 때 1% 내외의 오차로 정확한 농도를 알고 있는 이산화탄소 함유 건조 기체(표준기체)가 적외선 기체분석기의 측정값 오차를 보정하기 위해 이용된다. 이때 표준기체의 이산화탄소 농도가 실제 측정 장소의 대기 중 이산화탄소 농도와 유사한 값을 갖는 것이 좋다. 보정기체 용기는 일반적으로 매우 높은 압력을 갖기 때문에 기체 분석기와 직접 연결할 경우 손상을 야기할 수 있다. 따라서 기체용기를 시스템에 연결할 때 압력 조절기 (pressure regulator)를 이용하는 것이 필요하다.

### 2.6.4. 기체제거용 화학물질

프로파일 시스템의 운영을 위해서는 공기 중에 함유된 수증기와 이산화탄소를 제거하는 화학물질이 필요하다. 이들 기체성분이 제거된 공기는 제로보정 시에 기체분석기의 샘플셀이나 절대모드로 작동되는 기체분석기의 기준셀에 공급된다. 이들 화학물질은 먼지발생을 방지하고 표면적을 증가시키기 위해 불규칙한 형태의 다공성 입자상으로 사용된다. 입자의 크기는 메쉬(mesh)로 표현되는데 이는 1 평방인치의 면적에 들어갈 수 있는 입자의 크기를 말하고 수가 클수록 작은 입자를, 수가 작을수록 큰 입자를 의미한다. 특히 신선하고 좋은 상태의 물질을 사용하는 것이 시스템의 상태를 유지하는 무엇보다 중요하다. 일부의 화학물질은 색의 변화를 통해 물질의 상태를 지시하는 경우가 있다. 하지만 색의 변화가 물질의 상태를 지시하는 유일한 기준은 아니다. 때로, 공기의 흐름이 화학물질의

입자를 관통하는 통로를 만드는 경우(channeling effect)가 있는데 이 경우 기체제거 효과가 크게 감소하게 된다. 일반적으로 사용되는 화학물질로서 건조제의 경우, 과염소마그네슘(Magnesium perchlorate,  $Mg(ClO_4)_2$ )과 Drierite<sup>®</sup> 염화코발트(cobalt chloride); 이산화탄소 흡수제의 경우, 소다석회(Soda lime)와 Decarbite<sup>®</sup>가 있다.

### 2.6.5. 히터

아외에서 작동되는 프로파일 시스템이 급격한 외부 온도 변화에도 정상적으로 작동하도록 하기 위해 온도조절 장치가 있는 히터가 사용된다. 히터는 프로파일 시스템 전면패널 안쪽 다기관 주변에 팬과 함께 설치된다. 히터는 일 최저기온이 영하인 기간 동안에 작동시킨다.

### 2.6.6. 기압계

프로파일시스템에서는 물분율로 관측된 자료를 밀도로 변환하기 위해 대기압을 함께 측정하고 있으며, 설치된 대기압 측정 센서는 Integrated Silicon Pressure Sensor(Model: MPX4115A, Freescale Semiconductor, Inc.)이다. 이들 신호는 다음 관계식을 이용하여 대기압력으로 변환된다.

$$V_{out} = V_s(P \times 0.009 - 0.095) \pm (\text{pressure error} \times \text{Temp. Factor} \times 0.009 V_s) \quad (5)$$

여기서  $V_s$ 는 공급 전원(단위: V,  $V_s = 5.1 \pm 0.25 \text{VDC}$ ),  $P$ 는 대기압력,  $V_{out}$ 는 출력 전압(V)이다.

## III. 프로파일 시스템의 활용

### 3.1. 기체 농도 자료의 계산 방법, 자료 수집 및 저장

앞서 설명한 바와 같이 측정 시간, 순서 그리고 밸브의 전환은 데이터 집록기에 의해 이루어지는데, 본 시스템의 경우, 밸브가 새로운 높이로 전환되면 약 6초간의 안정화 시간이 소요되고 이후 4초간 측정이 이루어져 측정값의 평균이 계산된다. 기체분석기의 전기적 신호는 전압(mV) 단위로 집록기에 기록되며, 보정 변수(즉, 기울기(slope)와 오프셋(offset))를 이용하여 이산화탄소는 ppm, 수증기는 mmol/mol 단위로 변환된다. 이 때 사용되는 식은 다음과 같다.

$$CO_2 \text{ 농도(ppm)} = (CO_2[\text{in mV}] - \text{offset}) \times \text{slope} \quad (6)$$

$$H_2O \text{ 농도(mmol/mol)} = (H_2O[\text{in mV}] - \text{offset}) \times \text{slope} \quad (7)$$



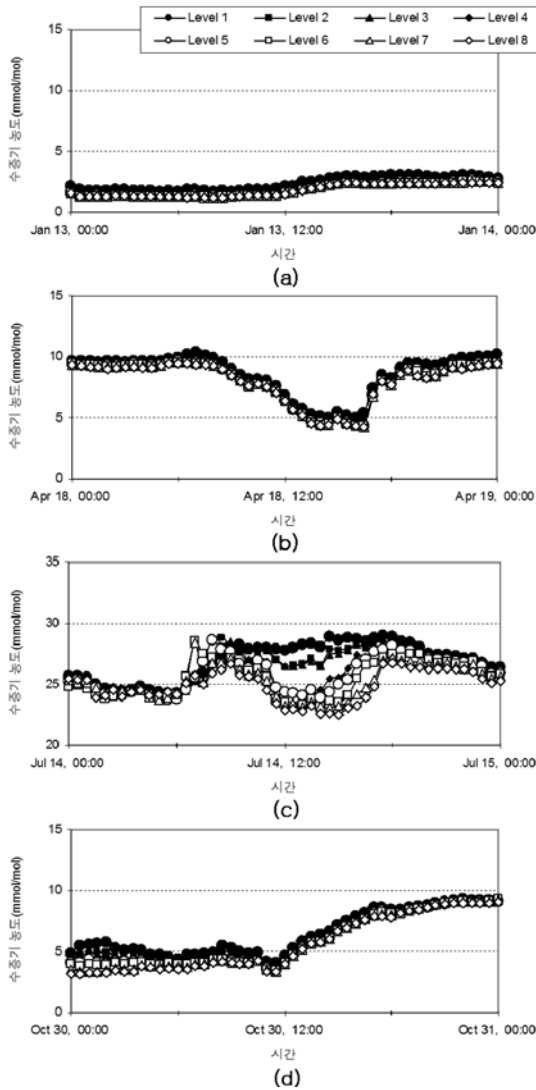
변환에 사용되는 기울기와 오프셋은 자동보정과 수동보정을 통해 결정된다. 기본값은 이산화탄소의 경우, 기울기는 0.21ppm/mV, 오프셋은 238.095mV, 수증기의 경우 기울기는 0.021mmol/mol/mV, 오프셋은 238.095mV이다. 그리고 위에서 언급한 것처럼 매 30분의 평균 시간에 대해 데이터 집록기는 수증기와 이산화탄소 농도 변화의 기울기를 최소제곱법 선형회귀

(least square linear fit)방법에 의해 계산한다.

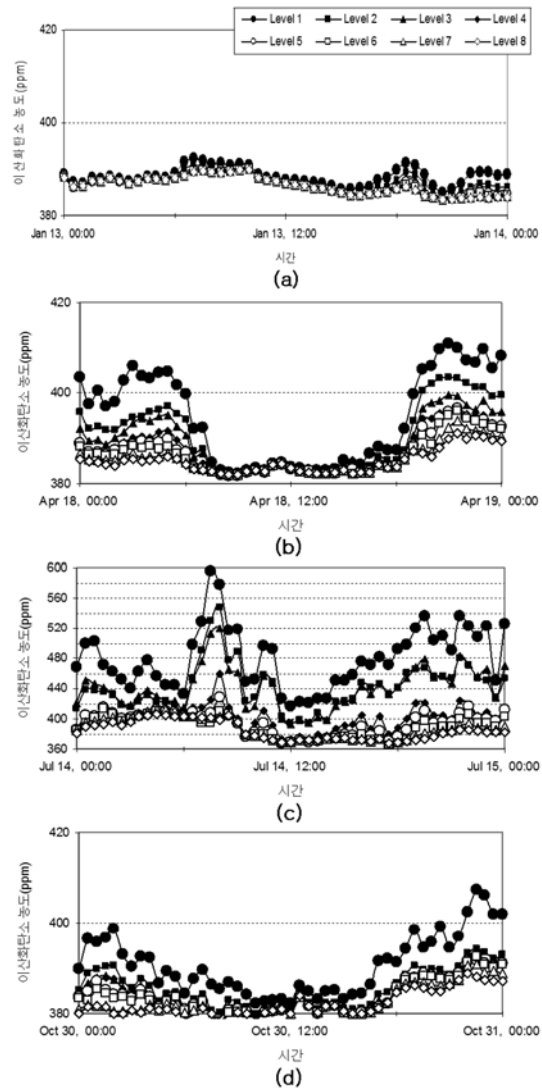
### 3.2. 자료의 활용

#### 3.2.1. 실측 수증기 농도 자료

Fig. 9는 2008년 각 계절별로 대표적인 날에 광릉 환엽수림에서 관측된 수증기 농도의 일변화를 보여주고 있다. 먼저 수증기 농도의 연직 분포를 보면 7월을 제외한 대부분의 기간동안 모든 높이에서의 수증기



**Fig. 9.** Daily Variations of Water Vapor Concentration in Gwangneung Deciduous Forest on, (a) 13 January, 2008, (b) 18 April, 2008, (c) 14 July, 2008 (d) 30 October, 2008. Note that the y-scale of fig. (c) is different from the rest. The height of each level: level 1-0.1m, level 2-1m, level 3-4m, level 4-8m, level 5-12m, level 6-18m, level 7-25m, level 8-40m.



**Fig. 10.** Daily Variations of CO<sub>2</sub> Concentration in Gwangneung Deciduous Forest on, (a) 13 January, 2008, (b) 18 April, 2008, (c) 14 July, 2008 (d) 30 October, 2008. Note that the y-scale of fig. (c) is different from the rest. The height of each level: level 1-0.1m, level 2-1m, level 3-4m, level 4-8m, level 5-12m, level 6-18m, level 7-25m, level 8-40m.

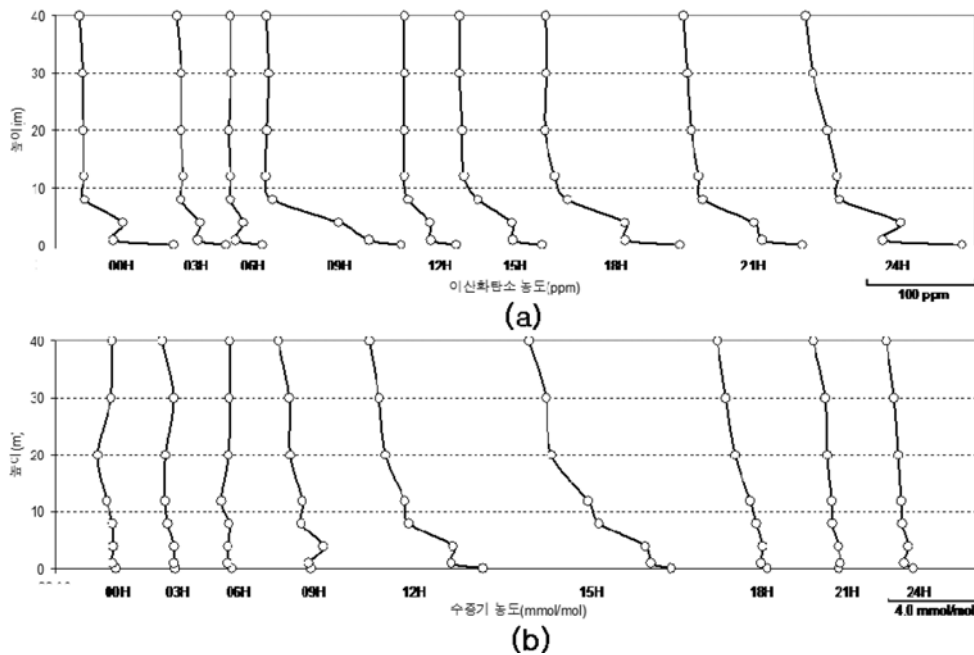


Fig. 11. Vertical Profiles of Three-Hour Averaged Water Vapor and CO<sub>2</sub> Concentration measured on 14 July, 2008.

농도가 거의 유사하고 동일한 변화경향을 나타낸다. 특징적으로, 여름 낮시간에 지표면 근처와 상층의 수증기 농도가 뚜렷하게 다른 값(지표면근처에서 높고 상층에서 낮은)을 보인다(Fig. 9(c)). 계절에 따라 나타나는 수증기 농도의 일변화 양상의 차이를 살펴보면 먼저 1월의 경우 가장 낮은 수증기 농도와 미약한 일변화(오후에 다소 증가)를 보이고, 4월의 경우 12~18시에 상대적으로 낮은 값을 그리고 10월의 경우 12시 이후 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 7월의 경우 앞서 언급한 바와 같이 지표면 부근에서는 12시를 전후한 시간에 하루 중 가장 높은 값을 그리고 상층에서는 같은 시간에 하루 중 가장 낮은 값을 보인다.

### 3.2.2. 실측 이산화탄소 농도 자료

Fig. 10은 2008년 광릉 활엽수림에서 관측된 이산화탄소 농도의 일변화이다. 4월의 12시를 전후한 시간대 그리고 1월의 경우 연직농도의 차이가 거의 보이지 않지만 이 기간을 제외한 다른 모든 기간에서 현저한 연직농도의 차이를 보이고 있다. 공통적으로 지표면 부근에서 가장 높은 이산화탄소 농도를 보인다. 하루중에는 대체로 낮시간보다 밤시간에 지표와 최상층간 이산화탄소의 농도 차이가 더 크다.

Fig. 11은 Fig. 10(c)와 같은 날 관측된 이산화탄소

(a)수증기(b)의 연직 분포의 변화추이를 3시간 간격으로 보여준다. 상하층간 농도 차이가 커질 때, 순생태교환량에 대한 저장항의 기여가 커지기 때문에(식 2) 이 시간대 연직 농도 분포 관측은 순생태교환량 추정의 정확도를 높이는데 매우 중요하다.

### 3.2.3. 저류/이류항이 복잡지형 산림생태계의 증발산 및 순생태교환량에 미치는 영향 해석

우리는 서론에서 이미 다중 수증기/이산화탄소 프로파일 관측 시스템이 복잡지형에서 증발산이나 이산화탄소 교환량을 추정하는데 있어서 매우 중요한 요소인 저류플럭스와 연직 이류항을 추정하는데 매우 유용하게 쓰일 수 있음을 언급하였다. 예를 들어, Hong *et al.*(2008)은 광릉 KoFlux 관측지에 설치된 다중 수증기/이산화탄소 프로파일 관측 시스템을 이용하여 두 지점에서 에디공분산 방법으로 관측된 난류 플럭스를 추정하여 1) 타워에서 관측되는 수증기와 이산화탄소 플럭스에 대한 수평 및 수직 이류항의 영향을 정량화하였고, 2) 저류항은 해떨녘과 해질녘에만 무시할 수 없는 양이지만 일누적의 관점에서는 무시할 수 있었고, 3) 이류의 영향은 에디공분산 기기의 관측높이(20m와 40m) 그리고 수증기와 이산화탄소에 따라 서로 다르게 나타났고, 4) 마지막으로 수평 이류와 연직 이류가

개별적으로 난류 플럭스 보다 크다고 할지라도 이 두 개의 독립적인 연직 플럭스는 서로 상쇄되는 경향을 보여 40m에서 관측된 플럭스의 경우 에디공분산 난류 플럭스항만으로 순생태 교환량을 정량화할 수 있음을 보여 주었다.

한편 다중 수증기/이산화탄소 프로파일 관측 시스템으로부터 얻어지는 수증기와 이산화탄소 농도를 역라그랑지 방법(inverse Lagrangian method)과 결합하여 대기과 식생 사이에 교환되는 난류 플럭스의 발원과 흡원의 강도가 연직적으로 어떻게 분포하는지 추정할 수 있다(예, Raupach, 1989; Denmead et al., 2005; Katul et al., 1997). 이 방법에서는 근략 난류가 근접장(near field)와 원격장(far-field)에 대해 서로 다른 효과를 보인다는 사실을 활용하여 수증기/이산화탄소 프로파일을 만들어내는 개개의 연직층의 발원 및 흡원 강도를 찾아내게 된다. 아울러 다중 수증기/이산화탄소 프로파일 관측 시스템을 활용하는 다른 예로는 수증기/이산화탄소 농도의 연직 프로파일 자료로부터 근략 내부의 오염 물질, 농약 또는 꽃가루의 확산을 예측하는 모형을 검증하고 개선하는데 사용하거나(예, Coppin et al., 1986; Haverd et al., 2009), 근략 하부에서 관측된 난류 플럭스의 발자국을 분석하고 이를 계산하는 발자국 모형의 성능을 평가하는데 활용될 수 있다(예, Baldocchi et al., 1997).

## 감사의 글

본 연구는 수자원의지속적확보기술개발사업단(과제 번호 1-8-3)에 의해 지원되었다. 본 보고서의 작성을 위해 많은 조언을 제공해 준 Campbell Scientific, Inc.의 Senior Application Engineer인 Edward Swiatek에게 감사의 뜻을 전한다.

## 적 요

연직으로 여러 높이에서 측정된 기체의 농도는 다양한 목적에 활용될 수 있다. 예를 들어, 복잡지형에 위치한 우리나라의 일반적인 산림유역에서 에디공분산 방법에 의한 증발산 및 이산화탄소 순생태 교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)을 관측하기 위해서는 수평 및 연직 이류(advection)와 저류(storage)항의 효과를 정량화해야 한다. 그리고 미량 기체의 발원 및 흡

원을 추적하거나 관측의 발자국 분석을 위해서도 필요하다. 수증기와 이산화탄소의 연직 농도 분포는 일반적으로 에디공분산 플럭스 타워에 보조 장치로 설치되는 다중 기체 프로파일 관측시스템(이하 프로파일 시스템)에 의해 측정된다. 이 시스템은 다른 미기상 관측기기와는 달리 서로 독립된 여러 기기와 장치들이 하나의 목적을 위해 결합되어 작동되기 때문에 사용방법과 기기의 운영/유지/보수에 많은 어려움이 따른다. 현재 전세계적으로 플럭스 타워 관측과 함께 이용되고 있는 프로파일 시스템은 대부분 미국의 캠벨사(Campbell Sci. Inc.)에서 제작/판매하는 시스템과 개별 연구자들이 각자의 목적과 관측환경에 적합하도록 자체 제작한 시스템으로 구분된다. 연세대학교 대기과학과 생물기상/생지화학 연구팀은 2005년부터 광릉 산림유역의 활엽수림과 침엽수림에 미국 캠벨사에서 제작한 두 개의 프로파일 시스템을 설치/운영하며 다양한 기술적, 이론적 경험과 지식을 축적해 왔다. 이 총설에서는 복잡지형 산림에서의 물과 탄소의 순생태 교환량 관측에 중요한 도구로 사용되는 프로파일 시스템의 원리, 구성, 활용 방법에 대해서 소개한다.

## Appendix: Specification

본 보고서에서 설명하고 있는 프로파일 시스템의 기본적 사양은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 공기흡입장치의 수: 8개
- 최대측정 높이: 40m
- 샘플링 빈도: 4Hz
- 측정값 평균시간: 30분
- 공기흡입장치의 공기유동속도: 1.3SLPM(대기압에 따라 달라짐)
- 내부 기압: 50kPa(관측지 대기압에 따라 달라짐)
- 전체높이 분석시간: 80초/1회
- 기체분석기 보정: 공장보정, 제로 및 표준농도 보정 1일 1회(사용자환경에 따라 변경 가능)
- 기체분석기 표준기체: 제로농도기체(절대모드) 또는 기체제거 화학물질
- 해상도: 0.1ppm(450ppm 농도기준), 30분 평균시간, 80초 분석 사이클, 6초간 측정값 생략 시
- 변화도(gradient) 계산: 장기 변화경향에 대한 시간비대칭보정에 의한 평균값
- 안정화시간(다기관과 기체분석기의 영향에 의한):

- 6초(이산화탄소 99.7%, 수증기 99.18%의 단계 변화 완료)
- 수증기 이동효과: 건조공기에 대한 이산화탄소와 수증기의 혼합관계를 이용
  - 이산화탄소 측정범위: 0-1000ppm
  - 전력 소모량: 약 3A(시스템 시작 시 6A)
  - 작동온도범위: 5-40°C
  - 상대습도범위: 0-95%에서 응결이 일어나지 않음
  - 케이스의 크기(inch): 22(W)×19(D)×40(H)

### REFERENCES

- Baldocchi, D. D., 1997: Flux footprints within and over forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology* **85**(2), 273-292.
- Bradford, W., K. J. Davis, C. Yi, P. S. Bakwin, and C. L. Zhao, 2001: Long-term carbon dioxide fluxes from a very tall tower in a northern forest: Flux measurement methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **18**, 529-542.
- Coppin, P. A., M. R. Raupach, and B. J. Legg, 1986: Experiments on scalar dispersion within a model plant canopy. Part II: An elevated plane source. *Boundary-Layer Meteorology* **35**, 167-191.
- Denmead, O. T., L. A. Harper, and R. R. Sharpe, 2000: Identifying sources and sinks of scalars in a corn canopy with inverse Lagrangian dispersion analysis I. heat. *Agricultural and Forest Meteorology* **104**, 67-73.
- Finnigan, J. J., 2006: The storage term in eddy flux calculations. *Agricultural and Forest Meteorology* **136**, 108-113.
- Haverd, V. R. Leuning, D. Griffith, E. van Gorsel, and M. Cuntz, 2008: The Lagrangian time scale for turbulent transport in forest canopies determined from measured fluxes and concentrations and modeled source distributions. *Boundary-Layer Meteorology, in press*.
- Hong, J., J. Kim, D. Lee, and J. Lim, 2008: Estimation of the storage and advection effects on H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> exchanges in a hilly KoFlux forest catchment. *Water Resources Research* **44**, W01426, doi:10.1029/2007WR006408.
- Katul, G., R. Oren, D. Ellsworth, C.-I. Hsieh, and N. Phillips, 1997: A Lagrangian dispersion model for predicting CO<sub>2</sub> sources, sinks, and fluxes in a uniform loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stand. *Journal of Geophysical Research* **102**, 9309-9321.
- Lee, X., 1998: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* **91**, 39-49.
- Raupach, M. R., 1989: Applying Lagrangian fluid mechanics to infer scalar source distributions from concentration profiles in plant canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **47**, 85-108.