

식물 환경 조절 시스템에서의 토양 호흡 관측 챔버법의 비교 실험

채남이¹ · 김래현² · 황태희³ · 서상욱⁴ · 이재석⁴ · 손요환² · 이도원³ · 김준¹

¹연세대학교 지구환경연구소 / 대기과학과

²고려대학교 환경생태공학부

³서울대학교 환경대학원 환경계획학과

⁴건국대학교 생물학과

(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

Intercomparison of Chamber Methods for Soil Respiration Measurement in a Phytotron System

Namyi Chae¹, Rae-Hyun Kim², Sang-Uk Suh³

Taehee Hwang⁴, Jae-Seok Lee³, Yowhan Son², Dowon Lee⁴ and Joon Kim¹

¹Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences

College of Natural Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

²Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

³Department of Environmental Planning, The Graduate School of Environmental Studies,

Seoul National University, Seoul, Korea

⁴Department of Biological Sciences, College of Science, Konkuk University, Seoul, Korea

(Received January 24, 2005; Accepted March 29, 2005)

ABSTRACT

Soil CO₂ emission is one of the primary components in carbon balance of terrestrial ecosystems. In soil CO₂ flux measurements, chamber method is currently the most common technique. Prior to compare or synthesize the data collected from different chamber methods, potential biases must be quantified for each measurement system. We have conducted an intercomparison experiment among four closed dynamic chamber systems and an automatic open-closed chamber system in a temperature-controlled phytotron. Due to the disturbed CO₂ concentrations inside the phytotron during the measurements with closed dynamic chambers and the changes in soil water content, the interpretation of the data was difficult to quantify the biases of individual methods. However, the experiment provided not only valuable information on the performance characteristics of the five instruments to varying soil temperature and CO₂ concentration but also useful insights for better designs and strategy for future intercomparison in a controlled environment.

Key words : Soil respiration, Chamber method, Intercomparison, Phytotron

I. 서 언

육상생태계의 탄소 순환에서 가장 중요한 과정은 광합성과 토양 호흡이다. 그 중, 토양 호흡은 탄소의 발원으로서 그 역할이 매우 중요하다(Schimel, 1995).

토양 호흡이란 자가 영양체인 식물의 뿌리 호흡과 타가 영양체인 토양 동물과 미생물의 호흡 그리고 탄소 복합체의 산화 과정에서 발생하는 이산화탄소가 토양에서 대기로 방출되는 과정을 말한다. 토양 호흡량을 조절하는 생물적인 요인으로는 식생과 토양 생물의 중

류, 미생물의 활성도 등이 있으며, 이러한 요인에 영향을 미치는 주요한 환경 조절 인자에는 토양의 온도와 수분 등이 제시되고 있다.

토양 호흡 측정을 위하여 토양 표면으로부터의 이산화탄소 발생량을 측정하는 챔버법이 가장 많이 사용되고 있다. 고전적 정량 방법으로 이산화탄소의 화학적 특성을 고려한 소다 석회법(soda lime method)과 알칼리 용액법(alkali solution method)이 있다. 또는 챔버로부터 채집한 공기를 기체 크로마토그래피(gas chromatography)나 적외선 기체분석기(IRGA, infrared gas analyzer)를 이용하여 분석하는 방법이 있다. 최근에는 IRGA를 챔버에 직접 연결하여 현장에서 실시간으로 측정하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이러한 다양한 관측기기들은 토양 호흡이 활발한 열대림과 온대림 및 북방 수림과 같은 산림 생태계를 중심으로 적용되고 있으며, 그 밖에 초원(Mielnick *et al.*, 2000; Luo *et al.*, 2001)이나 농지(Lohila *et al.*, 2003)에도 확대 적용되고 있다.

토양 호흡 관측에서 다양한 챔버를 동시에 사용하거나, 정량화된 토양 호흡 결과를 비교 또는 통합하기 위해서는 동일한 조건의 실험에서 기기간의 특성과 오차를 이해하고 정량화하는 것이 필요하다. 이러한 목적으로 다양한 챔버 측기들에 대한 비교 실험들이 수행된 바 있다. Liang *et al.*(2004)은 자체 개발한 개회로 자동 챔버에 대하여 폐회로 역학 챔버와 open-top 챔버 및 토양 CO₂의 농도 경도 시스템에 대한 야외 실험 결과에서, 대부분의 측기들이 개회로 자동 챔버보다 과대 평가함을 보였다. 그러나 일반적으로 산림 토양은 토양 호흡의 조절 인자 중 하나인 토양 수분과 부식층의 분포가 불균질하여 지표의 공간 변이가 크기 때문에, 야외에서의 비교 실험은 기기간의 반응 차이를 설명하는데 어려움이 따른다. 비교 실험에서 토양 호흡에 영향을 미칠 수 있는 환경 조절인자에 의한 발생 오차를 보완하기 위하여, 최근 유럽에서는 20개 챔버에 대해 토양 호흡(efflux)을 생성하고 조절할 수 있는 시스템을 사용하였다. 일반적으로 non-steady-state non-through-flow 챔버의 경우, 구조적으로 4-14% 과소 평가하며, 본 연구에서 사용되는 나머지 through-flow 챔버들은 큰 차이가 없었다(Pumpanen *et al.*, 2004).

본 연구에서는 2001년부터 KoFlux 프로그램에서 사용하고 있는 폐회로 역학 챔버 시스템(EGM-2,

EGM-4, LI-6400)과 건국대에서 개발된 개회로 자동 개폐 챔버 시스템(AOCC)을 비교하기 위하여, 2004년 2월에 식물 환경 조절 시스템(phytotron system)에서 비교 실험을 실시하였다. KoFlux 프로그램에서 추진하는 여러 관측지에서 다양한 측기로 관측된 토양 호흡의 시간적 또는 공간적으로 적분된 방출량을 정확하게 추정하기 위해서는 먼저 기기간의 비교 실험을 통해 차이와 특성을 고려해야 한다. 본 연구에서는 온도가 조절되는 실내 실험을 통해 토양 호흡 관측 기기간의 차이를 정량화하고, 실험 방법에 따른 문제점과 개선 방안을 논의하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 토양 호흡 측기

2.1.1. 폐회로 역학 챔버(Closed dynamic chamber: EGM-2, EGM-4, LI-6400)

폐회로 역학 챔버는 적외선 기체 분석기에 챔버를 장착하거나 또는 튜브로 연결하여 챔버내 이산화탄소 농도를 측정할 수 있도록 고안된 시스템으로, 본 실험에 사용된 측기는 영국 PP Systems 사의 적외선 기체분석기(EGM-2와 EGM-4, PP Systems, Hertfordshire, U.K)와 챔버(SRC-1, PP Systems, Hertfordshire, U.K)로 이루어진 토양 호흡 전용 관측 장비와 미국 LI-COR 사의 휴대용 광합성 측정기(LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE)의 광합성 챔버 대신 토양 호흡 챔버(6400-09, LI-COR, Lincoln, NE)가 교체된 관측 장비이다(Figs. 1 and 2). 두 기기의 챔버는 지름이 0.1m로 1l 가량의 부피를 가지며, 휴대용 충전지를 사용하므로 공간 이동이 매우 편리하다. 관측지 내에서 다양한 관측 지점을 자유로이 선정할 수 있는 장점이 있는 반면, 기기의 이동과 작동이 인력으로 유지되기 때문에 장기간 규칙적으로 일정한 시간 간격을 두고 연속적으로 관측하는 것은 매우 힘들다. 두 측기에 대한 내용은 Chae *et al.*(2003)에 자세히 언급되어있다.

2.1.2. 개회로 자동 개폐 챔버(Automatic Open/Closing Chamber)

건국대학교 환경생태학 연구팀에서는 산림 토양 호흡 관측에 맞게 챔버의 크기와 모양을 새롭게 고안하여, 2003년 여름부터 광릉 활엽수림에서 자동 개폐

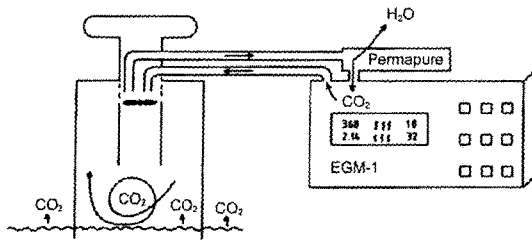


Fig. 1. Schematic of EGM-4 and SRC-1(PP Systems, 2003).

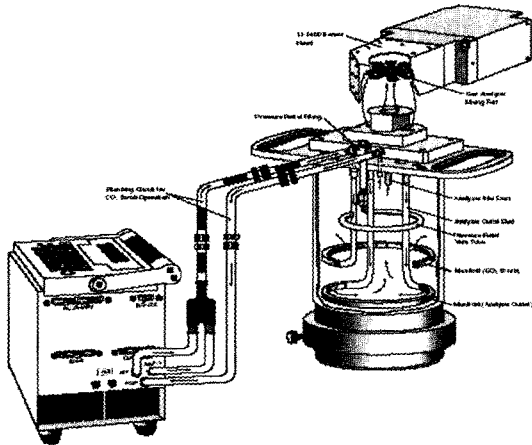


Fig. 2. LI-6400 soil CO₂ efflux system setup. The shaded plumbing circuit is for CO₂ scrub operations and is only used during the draw down portion of a measurement cycle. During the actual measurement, mixing in the chamber headspace is achieved with the gas analyzer mixing fen and the associated plumbing(LI-COR, Inc., 1997).

챔버를 이용한 관측을 진행하고 있다. 개회로 자동 개폐 시스템은 두 대의 적외선 기체 분석기에 여러 개의 챔버가 연결되어 각 챔버들이 시간 차이를 두고 자동으로 닫히면서, 그 시간 동안 챔버에 유출입되는 이산화탄소 농도를 측정하여 그 차이로부터 토양에서 대기로의 플럭스를 계산한다. 이 시스템의 장점은 여러 개의 챔버를 공간적으로 배치하여 고정된 위치에서 장기간에 걸쳐 연속적으로 실시간 자동 관측이 가능한 점이며, 강수 등의 실측이 어려운 열악한 조건에서도 관측 자료를 얻을 수 있는 점이다. 단점으로는 공간 이동에 대한 제한과 지속적인 전원 공급이 가능한 곳에서만 시스템 유지가 가능하다는 점이다.

개회로 자동 개폐 시스템은 챔버부, 펌프부, 타이머부의 3개 주요 부분으로 구성되어 있다(Fig. 3). 펌프부는 버퍼 탱크(S), 공기펌프, 유량계, 공기필터, 제습기, IRGA(infra-red gas analyzer, LI820, LI-COR.,

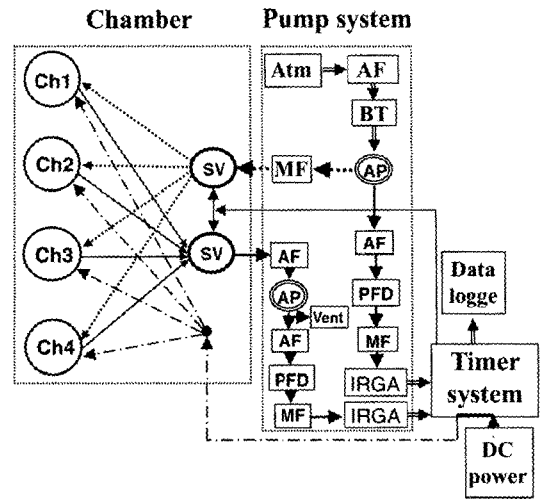


Fig. 3. Flow through automatic open/closing chamber system. Abbreviations: Atm, atmospheric air; BT, air buffer tank; AF, air filter; AP, air pump; MF, mass flow meter; SV, solenoid valve; Ch, chamber; PFD, pamer-pure drier; IRGA, infra-red gas analyzer; DC, 12 volt DC power.

USA) 등으로 구성되어 있다. 타이머부는 챔버 뚜껑의 개폐와 전자밸브의 개폐 그리고 적외선 기체 분석기의 자료를 집록기 연결 단자에 분배하는 역할을 한다. 타이머부는 챔버 뚜껑의 개폐 시간을 조절하는 타이머와 챔버 모터에 전원을 순차적으로 공급하는 릴레이로 구성되어 있다. 챔버의 모양과 크기는 챔버내에서 공기 순환 정체부가 발생하지 않도록 장방의 8각형 (20×30×8cm, L×W×H)으로 설계되었다. 챔버 개방시 내부와 외부의 공기 순환이 원활하도록 비교적 낮은 높이로 설계되어 있으나, 토양의 표면 상태에 따라서 다양한 높이의 collar를 이용한 높이 조절이 가능하다. 챔버의 무게는 약 3kg 이고, 야외의 습한 조건에서 내구성을 가질 수 있도록 스테레스 금속재질이며, 공기의 유입구와 배출구로 구성되어 있다. 유량은 실험토양 배지의 최대호흡속도를 고려하여 1.8l/min으로 설정하였으며, 밀폐시 잘 혼합된 대기의 공기가 지속적으로 챔버에 공급되며 동시에 0.6l/min의 공기가 IRGA로 유입되어 초기 CO₂ 농도값을 측정하게 된다. 챔버로 공급된 공기는 동일한 양이 펌프에 의해 배출되며 그 중 0.6l/min는 IRGA로 보내져 CO₂ 농도를 측정하게 되며, 이 값을 초기값과 비교하여 그 차로부터 토양 호흡량을 계산하게 된다. CO₂ 농도는 10초마다 측정되며 5분 평균 값이 저장된다. 토양호흡의 계산은 챔버의 공기 유입구와 배출구의 CO₂ 농도로부

터 계산된다.

$$SR = apV/A \quad (1)$$

여기서 $SR(\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1})$ 은 토양 호흡, a 는 챔버의 공기 유입구와 배출구에서 CO_2 농도차($\mu \text{ mol mol}^{-1}$), V 는 챔버로 유입되는 공기량($\text{m}^3 \text{ hr}^{-1}$), ρ 는 공기밀도(kg m^{-3}), A 는 collar가 설치된 표면적(m^2)을 나타낸다.

2.2. 식물 환경 조절 시스템에서의 비교 실험

2.2.1. 토양 배합 및 수분 관리

비교 실험 전, 토양 호흡의 활성을 유도하기 위하여 첨가할 토양의 성분을 조사 하였다. 여러 종류의 토양(적옥토, 상토, 계분, 마사토) 배합 중 마사토와 계분의 혼합이 토양 온도 변화에 따른 반응이 매우 좋았다. 따라서 비교 실험에서 야산의 일반 토양 80%와 마사토와 계분이 1:1로 혼합된 토양 20%를 혼합하여 토성이 균질하도록 배합하였다. 식물 환경 조절 시스템의 배지에 토양을 잘 정리한 후, 토양의 물리적인 구조가 안정될 수 있도록 충분한 물을 공급한 후 하루 동안 안정화 시간을 가졌다. 안정화 이후 식물 환경 조절 시스템의 고온 유지로 토양 증발이 가속되어 낮아진 토양 수분(16~20%)의 보충을 위하여, 19일 관측 직후 약 9l 가량의 수분을 공급하여 토양 수분의 감소를 방지하였다.

2.2.2. 식물 환경 조절 시스템

식물 환경 조절 시스템의 크기는 폭 1.9m, 길이 2.4m, 높이 2.4m이다. 내부에는 폭 1.9m, 길이 1.0m, 높이 0.2m의 배양대에 배합된 토양을 0.15m 깊이로 균일하게 설치하였다. 식물 환경 조절 시스템 내부의 공기 온도 조절은 가능하나, 내부의 공기가 외부로 배출되는 공기 순환 시스템이 갖춰지지 않아 식물 환경 조절 시스템의 문을 열고 내부 공기를 환기해야 하는 불편함이 있다.

2.2.3. 측기의 비교 실험

본 실험에서는 EGM-2와 LI-6400 각각 한대, 두대의 EGM-4 그리고 두 개(1번, 2번)의 챔버로 구성된 AOCC를 비교하였다. 폐회로 챔버 관측을 위하여 PVC collar(높이 4cm, 지름 10cm)를 1.5m 가량 떨어진 두 AOCC 챔버 안에 설치 하였다. 또한 두 지

점을 포함한 10개의 collar에서 폐회로 역학 챔버 측기간의 비교도 함께 실시하였다. 다양한 조건에서 결과를 얻기 위해, 식물 환경 조절 시스템 내의 공기 온도를 조절하여 토양 온도를 23-28°C, 14°C, 8°C로 구분하여 폭넓은 온도범위에 대한 기기간 토양 호흡량의 차이를 관측하였다(Fig. 4). 이러한 관측은 5일간에 걸쳐 하루에 2-3회씩 실시되었다. 그러나 EGM-2의 경우는 기기의 문제로 후반 3일 동안만 관측되었다. 또한 식물 환경 조절 시스템 내부에서 토양으로부터 발생된 이산화탄소가 축적되어 농도 증가가 일어나지 않도록 출입문을 적당히 개폐함과 더불어 경우에 따라서는 강제환기를 실시하였다.

토양 온도는 7cm 깊이에서 연속 측정하였고, 토양 수분은 10cm 깊이에서 토양 호흡 관측 전 또는 관측 후에 1회 이상 측정하였다. 토양 온도는 두 관측 지점이 포함된 10곳에서 거의 차이가 없었으나, 토양 수분의 공간 분포는 변동을 보였다. 토양 배지의 여러 지점(8~10)에서 토양 수분의 평균 값은 20일 24(±4)%, 21일 22(±4)%, 22일 18(±5)% 그리고 23일은 16(±1)% 이었다. 비교 지점인 1번과 2번, 두 곳의 차이는 23일을 제외한 대부분 기간 동안 1번에서 대체적으로 높은 토양 수분을 보였다.

2.3. 통계분석

AOCC 챔버와 공유한 두 지점에서 관측된 네 측기의 토양 호흡 결과는 분산 분석을 이용하여 각 기기간 차이의 유의성 여부를 검정하였다(SAS, 1988). 통계적으로 유의성이 인정된 평균치 간의 검정은

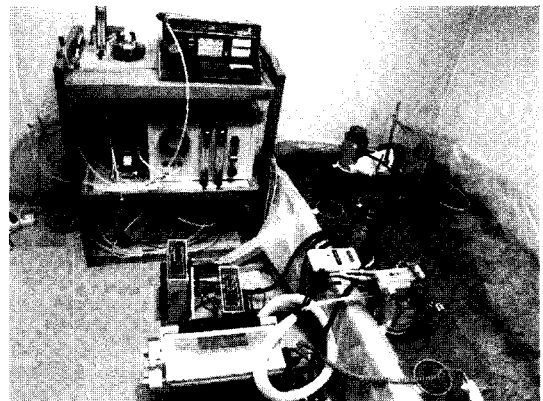


Fig. 4. Intercomparison experiment of chamber methods in phytotron system for soil respiration measurement.

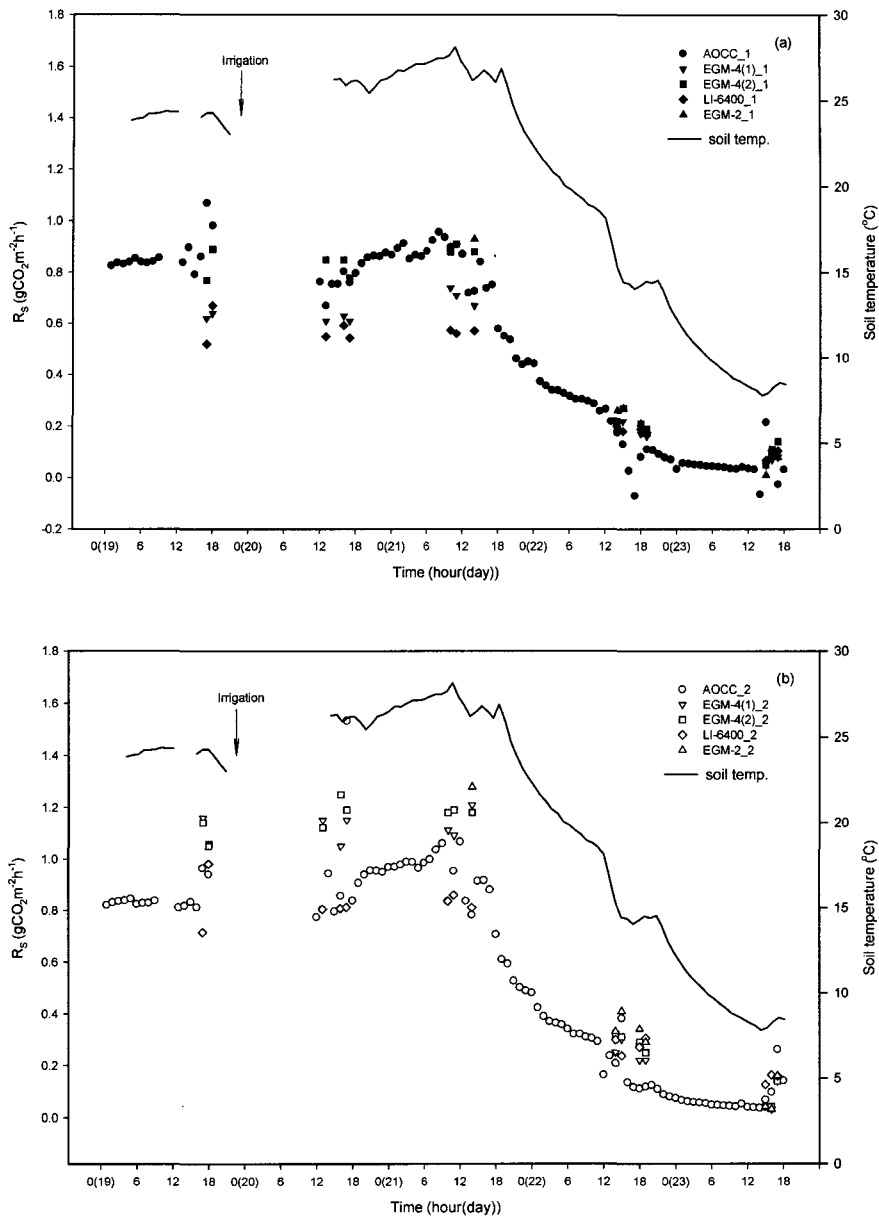


Fig. 5. Measurement of soil respiration using five instruments for No.1(a) and No.2(b) during five days.

Duncan's test를 이용하였다.

III. 결 과

비교 실험은 5일 동안 AOCC 시스템의 두 챔버(1번, 2번)에서 실시되었다. 네 대의 폐회로 역학 챔버는 AOCC의 두 챔버 내부에 collar를 설치하여 관측

하였다. 토양 온도에 따른 토양 호흡 값의 범위는 고온(23-28°C)에서 0.54~1.25g m²h⁻¹, 중간 온도(14°C)에서는 0.16~0.41g m²h⁻¹ 그리고 저온(8°C)에서는 0.03~0.16g m²h⁻¹ 이었다(Figs. 5a and 5b). AOCC 챔버와 폐회로 역학 챔버들의 결과는 토양 온도의 변화에 일치하는 반응을 보였다. 연속적으로 관측되는 AOCC의 경우, 토양 온도 8~28°C에 대한 토양 호흡

의 Q_{10} 값은 두 곳에서 모두 3.5로 같았다.

두 관측 지점의 토양 호흡 값 비교에서, 20일과 21일 AOCC 단독 관측시 두 지점은 10% 전후의 차이를 보였다. 그러나 관측자의 출입이 있었던 폐회로 챔버와의 동시 관측 시간대에서는, 매우 크게 과대 평가된 20일의 마지막 값과 23일 음의 값이 관측된 두 값을 제외한 결과에서, 두 지점의 차이는 평균 31%이었다. 다른 측기들의 경우는 두 지점간의 차이는 EGM-4(1)은 42%, EGM-4(2)는 36%, EGM-2는 45% LI-6400은 33%로 모두 비슷한 차이를 보였다.

네 측기의 비교 결과, 관측 지점 1번에서 AOCC \approx EGM-4(2) > EGM-4(1) > LI-6400 이었고(Fig. 5a), 2번에서는 EGM-4(2) \approx EGM-4(1) > LI-6400 \approx AOCC 순으로 정량적인 차이를 보였다(Fig. 5b). 토양 호흡 값이 높게 관측된 1번에서는 폐회로 역학 측기들이 AOCC 결과보다 과소 평가하는 반면(Fig. 5a), 2번에서는 과대 평가하고 있다(Fig. 5b). 10°C이하의 낮은 온도의 경우, AOCC에 의해 관측된 호흡량이 가장 작았고, 또한 후반 3일 동안에는 EGM-2가 일반적으로 가장 큰 값을 보였다. 적은 양의 자료이지만 각 지점에 대하여, EGM-2를 제외한 네 측기들의 값을 분산 분석을 이용하여 비교하였다(Table 1). 두 지점 각각에 대하여, 온도 구분 없이 전체 자료를 이용하여 네 측기들을 비교한 결과에서 정량적인 차이는 없었다($p > 0.05$). 또한 네 폐회로 역학 챔버들의 8회 동시 관측이 있었던, 10 지점의 평균을 이용한 분산분석에서도 차이가 없었다($p > 0.05$).

IV. 요약 및 결론

다양한 방법과 기기로 관측된 토양 호흡 자료를 정량적으로 평가하고 통합하려면 기기 상호간의 비교와 기기의 수행특성에 대한 정량적인 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 현재 KoFlux 관측지에서 사용중인 폐

회로 역학 챔버와 개회로 자동 개폐 챔버의 특징을 이해하고, 실내 비교 실험을 통해 기기간의 반응 정도와 정량적인 차이를 평가하였다.

식물 환경 조절 시스템에 설치된 토양 배지의 두 지점에서 비교 실험을 실시하였다. 다섯 측기의 정량적인 비교에 앞서 먼저 조절 시스템 내의 두 지점간의 결과를 분석하면, 동일한 조건의 토양 배지를 준비하였음에도 불구하고, 두 지점의 토양 호흡이 정량적인 차이를 보였다. 원인 중의 하나는 토양 배지 표면의 토양 수분 함량 차이를 들 수 있는데, 토양 배지 바닥의 구조적인 문제로 일어난 불균일한 배수 때문으로 추정된다. 두 지점의 비교에서 모든 측기들은 30-40%의 비슷한 차이를 보이며 반응 정도는 크게 다르지 않았다. 또한 두 지점 각각에서 AOCC 결과에 대한 폐회로 역학 챔버들의 반응이 다르게 나타났는데, 1번에서는 AOCC에 대하여 폐회로 역학 측기들이 과소 평가하는 반면, 2번의 경우는 대부분 과대 평가하였다. 이에 대한 원인 중 하나로 AOCC 챔버의 관측 영역과 폐회로 역학 챔버들이 차지하는 관측 공간의 차이로 토양 호흡의 차이가 발생되었으리라 생각된다. 또한 AOCC와 폐회로 역학 측기와의 동시 관측시 나타나는 AOCC 관측 값의 변동은 폐회로 챔버 관측을 위해 관측자들의 식물 환경 조절 시스템의 출입시 내부 공기 순환이 제대로 이루어지지 않아 이산화탄소 농도가 불안정하게 증가(100ppm 이상)하였기 때문으로 사료된다. 폐회로 역학 챔버들간의 관계에서는 기존의 다른 연구 결과와 마찬가지로 EGM이 다른 측기 보다 과대 평가하는 경향을 보였다(Norman *et al.*, 1997; Law *et al.*, 2001). 이러한 관측 방법상의 문제들을 감안하여 두 지점 각각에 대한 전체 결과를 분산 분석을 통하여 비교하였을 때, 토양 온도 전 범위에 대해서 측기간 차이는 없는 것으로 나타났다. 그러나 자료의 양이 적어 보다 정확한 비교를 위하여 반복수의 증가가 필요하다.

본 실험은 예비적인 실내 비교 실험으로, 방법과 관측 시스템의 한계로 분석 결과를 명확하게 단정하기는 어렵다. 그러나 이러한 예비 실험 과정과 결과 분석에서 발견된 문제점들을 보완하여 구체적인 실내 실험 체계를 구축한다면 보다 나은 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 먼저 방법적인 면에서 온도 구간을 보다 세분화하여 온도 구간에 따른 토양 호흡 변이를 파악하고, 변이가 큰 구간에 대하여 기기간 비교 실험을

Table 1. Intercomparison of four instruments for two points.

Instrument	Chamber 1 (n=14)	Chamber 2 (n=14)
AOCC	0.54 (± 0.38)*	0.53 (0.37)
EGM-4(1)	0.44 (± 0.27)	0.65 (± 0.50)
EGM-4(2)	0.56 (± 0.35)	0.68 (± 0.51)
LI-6400	0.39 (± 0.22)	0.53 (± 0.32)

*Standard deviation of the mean is in parenthesis.

집중적으로 실시하는 것이 중요하다. 또한 통계적으로 유의한 반복 실험을 통해 정확한 정량적인 차이를 규명하여 기기간의 보정 계수를 산출한다면, 실제 야외 관측 결과의 비교에서 매우 유용하게 활용될 것이다. 아울러 식물 환경 조절 시스템을 이용한 실내 실험에 개선을 다음과 같이 제안한다. (1) 휴대용 폐회로 챔버 관측 시 관측자의 실내 입실이 불가피하여 실내 이산화탄소 농도 변화를 초래하여, 토양 호흡 방출에 영향을 주어 오차를 유발할 수 있다. 따라서 기본적으로 내부 공기 순환이 가능한 시스템이 필요하며, 특히 실내의 이산화탄소 농도를 일정하게 유지할 수 있는 장치가 보완되어야 한다. (2) 토양 수분과 관련하여 토양 배지의 배수 문제를 고려하여 구조적인 점검이 이루어져야 하며, 시스템 내부의 온도 증가 시 토양 표면이 쉽게 건조해져 갑작스러운 토양 수분 변화를 일으킬 수 있으므로 이를 고려하여 내부 습도를 유지하거나 조절할 수 있는 장치를 보완해야 한다. (3) 크기가 다른 챔버를 서로 비교할 때, 차지하는 면적 차이에 따른 오차를 최대한 줄이기 위하여 최대한 동일한 영역을 선택해야 한다.

생태계의 탄소 순환을 연구하는 야외 관측에서는 종종 다른 종류의 토양 호흡 측기가 동시에 이용되는 경우가 있다. 이는 토양 호흡을 연구하는 연구자에 따라 관측기기를 다양하게 변형하고 개발한 결과이다. 이러한 경우, 각각의 측기로 측정된 값의 신뢰성을 확보하기 위해 측기간의 비교 측정은 필수불가결하다. 본 연구는 측기간의 반응 차이를 알아보기 위한 토양 호흡의 정량적인 비교에 앞서, 식물 환경 조절 실험실을 이용한 비교 실험 방법의 문제들을 지적하고 해결책을 제시하는 계기가 되었다.

V. 적 요

토양 호흡은 주요 육상 생태계의 탄소 순환을 이해하는데 중요한 성분 중 하나이다. 토양 호흡 관측에서 챔버 방법은 가장 일반적인 방법이다. 다양한 토양 호흡 챔버 방법에 의해 이루어지는 관측 값들을 비교하기 위해서는, 측기의 특성에 따른 오차를 파악하는 것이 필요하다. 이를 위하여 온도 조절이 가능한 식물 환경 조절 시스템에서 네 개의 폐회로 역학 챔버와 자동 개폐 챔버를 비교하였다. 식물 환경 조절 시스템의 내부의 이산화탄소 농도의 변동과 토양 수분의 변

동으로 어느 정도의 오차가 포함된 결과이지만, 실험을 통해 토양 온도와 이산화탄소 농도의 변화에 따른 네 측기들의 반응 특성과 실내 비교 실험의 계획과 방법에 대한 중요한 교훈을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)”의 지원을 받아 수행되었다. 실험에 도움을 준 건국대학교 이준석, 서울대학교 환경 대학원 김경희와 김승 그리고 고려대학교 구진우와 서경원에게 고마움을 전한다.

인용문헌

- Chae, N., J. Kim, D. Kim, D. Lee, R. Kim, J. Ban, and Y. Son, 2003: Measurement of soil CO₂ efflux using a closed dynamic chamber system. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2) 94-100.
- Law, B. E., Kelliher, F.M., Baldocchi, D. D., Anthoni, P. M., Irvine, J., Moore, D., and Tuyl, S. V., 2001: Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forest during a summer drought. *Agricultural Forest Meteorology* **110**, 27-43.
- Liang, N., T. Nakadai, T. Hirano, L. Qu, T. Koike, Y. Fujinuma, and G. Inoue, 2004: In situ comparison of four approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **123**, 97-117.
- LI-COR, Inc., 1997: *LI-COR 6400-09 Soil Flux Chamber Instruction Manual*. Lincoln, Nebraska.
- Lohila, A., M. Aurela, K. Regina, and T. Laurila, 2003: Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. *Plant and Soil* **251**, 303-317.
- Luo, Y., S. Wan, D. Hui, and L. Wallace, 2001: Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature* **413**, 622-625.
- Mielnick, P.C., and A. D. William, 2000: Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry* **32**, 221-228.
- Norman, J. M., Kucharik, C. J., Gower, S. T., Baldocchi, D. D., Crill, P. M., Rayment, M., Savage, K., and Striegl, R. G., 1997: A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *Agricultural Forest Meteorology* **102**(28) 771-777.
- Pumpanen, J., P. Kolari, H. Ilvesniemi, K. Minkinen, T. Vasala, S. Niinisto, A. Lohila, T. Larmola, M. Morero, M. Pihlatie, I. Janssens, J. Yuste, J. M. Grunzweig, S. Reth, J. Subke, K. Savage, W. Kutsch, G. Ostreng, W. Ziegler, P. Anthoni, A. Lindroth, and P. Hari, 2004:

- Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology* **123**, 159-176.
- PP Systems. 2003: *EGM-4 Operators Manual-version 4.12*. PP Systems Inc.
- SAS. 1988: *SAS/STAT Users Guide*, 6.03 edition. SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Schimel D.S., 1995: Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* **1**, 77-91.