

생태계 탄소순환 이해를 위한 국내 토양호흡 연구의 고찰

이재호 · 이준석 · 전영문 · 채남이 · 이재석*

(건국대학교 생명과학과)

Discussion of Soil Respiration for Understanding Ecosystem Carbon Cycle in Korea. Lee, Jae-Ho, Jun-Seok Yi, Young-Moon Chun, Nam-yi Chae and Jae-Seok Lee* (Department of Biological Sciences, Konkuk University, Seoul 133-701, Korea)

In territorial ecosystem, soil has stored considerable amount of carbon, and it is vulnerable to weakness release much of the carbon to atmosphere. In this study, we have been effort realization and discussion to the error between inter-instruments and measurement methods, time and special variations, gap filling and separation from each source included in soil respiration, used to collect soil respiration data in various ecosystems in Korea. In conclusion, it have to collect calibration data throughout comparison test between methods and instruments because accumulated data from past and accumulating data in present did not calibrated. In predicting change of soil carbon dynamic using the model method, it needs important data such as long-term and short-term data, artificial handling data of major factor, data from various ecosystem, soil texture, soil depth etc. In company with, we should collect highly qualified data through deep consideration of present problems.

Key words : climate change, territorial ecosystem, carbon budget, soil respiration

서 론

북반구를 주로 하는 육역생태계 내의 식생에는 약 550 Pg의 탄소가 저장되어 있다. 이에 비해 토양권에는 식생의 약 3배, 대기(약 755 Pg)의 약 2배에 해당하는 1,500 Pg의 탄소가 축적되어 있는 것으로 보고되고 있다 (Waring and Running, 1998; DOE, 1999). 이러한 육역생태계가 매년 대기로부터 흡수하는 탄소량은 약 2 ± 1 Pg yr^{-1} 으로 추정되고 있다 (IGBP, 1998). 식생은 광합성을 통해 막대한 양의 탄소를 흡수하지만 토양권은 미생물과 식물의 호흡을 통해 막대한 양의 탄소를 대기에 방출한

다. 특히 토양권에 저장되어 있는 막대한 양의 탄소를 호흡원으로 이용하는 미생물은 온도 증가에 따라 지수적인 호흡속도 증가를 보이는 특성을 가지기 때문에 기후변화에 의한 온도 증가는 토양권 탄소의 저장량을 크게 감소시킬 수 있으며, 그 결과 대기의 CO₂ 농도는 큰 폭으로 증가할 것으로 예측되고 있다.

이와 같은 원인으로 육역생태계의 탄소수지 특성, 특히 토양권의 탄소수지를 정확하게 규명하는 것은 전 지구적 규모에 대한 장래의 대기-식생-토양 간 탄소순환 메커니즘과 양적 순환 관계를 파악하는 데 대단히 중요한 의미가 있을 뿐 아니라, 지구 탄소의 전 지구적 순환 추이 파악과 예측에 있어 중요한 요소로서 역할을 한다 (Suh et

* Corresponding author: Tel: +82-2-450-3411, Fax: +82-2-3437-3411, E-mail: jaeseok@konkuk.ac.kr

al., 2005a). 이러한 이유로 육상생태계 탄소수지에 관한 연구는 기후변화의 예측과 그 결과의 신뢰성에 영향을 미치는 핵심적인 요소인 관계로 중요한 연구 관심사가 되어 왔다. 육역생태계의 탄소순환에 있어 가장 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 다양한 산림생태계의 탄소순환에 대해 연구가 활발히 진행되어 왔다 (Saigusa et al., 2002).

생태계의 탄소순환에 중요한 요소인 토양권 탄소수지는 기후변화에 따른 온도 변화에 민감하게 반응하기 때문에 지구적 탄소순환에서 가장 중요한 요소로 취급되어 왔다 (Liang et al., 2003; Lee et al., 2010). 토양생태계로 유입되는 탄소형태는 대부분 생물의 일부 또는 전체에서 유래된 사체나 배설물 형태로 유입되며, 유입된 유기 탄소는 토양 미생물을 주축으로 하는 다양한 소비자의 호흡 결과, 즉 토양호흡에 의해 대기로 방출되고 일부 난분해성 유기탄소가 토양 내 유기물 형태로 축적된다. 이러한 과정에서 토양호흡은 생태계의 순탄소흡수량 (NEP: Net Ecosystem Production) 크기를 결정짓는 주요 요인 중 하나가 되고 있다 (Lee, 2003).

토양호흡에 의한 대기로의 탄소 방출 과정에는 생태계의 다양한 물리화학적 환경요인이 관여하여 토양에 다양한 환경 조건을 조합해 제공하기 때문에 측정된 토양호흡 자료는 매우 복잡한 양태를 보인다. 이러한 이유로 연구자가 수집한 자료 간 오차가 발생할 뿐만 아니라 자료 비교를 어렵게 만드는 근본적인 요인이 되고 있다. 또한 국내 생태계의 장단기적 탄소순환 변화 예측을 위한 모델연구의 적용에 있어서도 한계성을 가지는 근본적인 요인으로 작용하기 때문에 토양호흡에 관련된 문제점을 인식할 필요성이 제기되어 왔다 (Suh et al., 2005a; Lee et al., 2010).

본 연구에서는 국내에서 적용되는 토양호흡의 측정 방법론과 측정 기기 간의 오차, 시공간적 불균일성, 연속 및 단기 측정에서 결측되는 자료들을 어떻게 gap filling할 것인가에 대한 문제, 토양호흡속도와 양에 영향을 주는 다양한 환경요인, 연속된 토양호흡 자료 구축을 위해 필요한 사항들에 대해 고찰하고자 한다.

본 론

1. 국내의 토양호흡 측정 방법 및 측정 기기 간의 오차

1) 토양호흡의 측정 방법론

토양호흡의 측정은 기본적으로 챔버라고 불리는 사각

형 또는 원통형의 상자를 이용하는 챔버법 (chamber method)이 가장 널리 이용되고 있다. 이러한 챔버는 일정 깊이까지 땅에 박힌 나머지 부분이 지표면에 약 5 cm 정도 돌출된 형태를 가지는 칼라 (collar)라 불리는 고정틀의 상부에 바닥의 한 면만이 개방된 형태를 가진 뚜껑 (cap)을 결합하여 한쪽 면을 지면으로 한 밀폐 공간을 만드는 형태가 된다. 칼라와 캡에 의해 만들어진 내부의 밀폐공간은 지표면만이 개방된 상태로 되어 있기 때문에 내부 공간의 공기는 토양에서 확산 방출되는 CO₂에 의해 시간 경과에 따라 CO₂ 농도가 점차적으로 증가하게 된다. 이러한 증가 속도는 토양에서의 방출속도에 비례하며 (Lee et al., 2010), 챔버법은 바로 이 밀폐된 공간 내에서 CO₂ 농도 증가 속도를 변수로 토양호흡속도를 계산한다. 하지만 장시간 챔버를 결합한 상태로 둘 경우, 지면 환경이 실질적 변화를 가져와 본래의 토양호흡을 측정할 수 없기 때문에 자연적인 환경의 변형없이 정확하고 빠르게 토양호흡을 측정하기 위한 다양한 기기들이 개발 및 개선되어 왔다. 이러한 측정의 초기 방법으로 밀폐된 공간 내에 CO₂를 흡수하는 성질이 있는 일정량의 알칼리용액을 스폰지에 적서 내부에 마련된 점시에 올려 놓은 후 일정 시간 경과 후 스폰지의 알칼리용액을 회수하여 화학적 방법을 통해 녹아 들어간 CO₂ 양을 정량하여 단위 시간당 토양에서 방출된 CO₂ 양을 계산하는 방법이 사용되었다 (Kirita, 1971). 이후 물리화학적으로 CO₂ 분석이 가능한 분석 기기들이 개발되면서 내부의 공기를 일정 간격으로 채취하여 가스 크로마토그래피 (Gas chromatography)나 간단화된 CO₂ 분석기를 사용하여 CO₂ 농도를 분석하는 방법 (closed static chamber method), 외부에 공기펌프와 CO₂ 분석기를 설치하여 현장에서 직접 내부의 CO₂ 농도 증가 속도를 측정하는 폐회로역학챔버법 (CDC법: closed dynamic chamber method, Fig. 1a), 캡과 분석기, 공기펌프가 일체화되어 상용화된 기기 (LI-6400, EGM 시리즈) 등이 개발되었고 현재에는 현지의 상황에 따라 이러한 방법들이 다양하게 이용되고 있다. 이러한 다양한 방법들 중 국내에서 주로 이용되는 방법으로는 밀폐식을 기반으로 구성된 자동개폐식 챔버를 이용하여 현장에서 실시간 토양호흡 자료를 연속적으로 수집하는 자동토양호흡 측정 (AOCC; automatic opening/closing chamber, Suh et al., 2005a), 같은 방법에 기초하지만 휴대형으로 개발되어 단기적인 자료를 수집하는 Li-6400 (Li-Cor. Inc. USA)와 EGM 시리즈 (PP system, U.K), CO₂의 확산에 의해 측정하는 밀폐챔버법 (GMT 시리즈, Vaisala, Finland) 등이 있다. 이와 같은 밀폐법은 내부의 높은 CO₂ 농도가 확산을 억제하여 토양호흡 속도를 낮추는 문제가 제기됨으로써

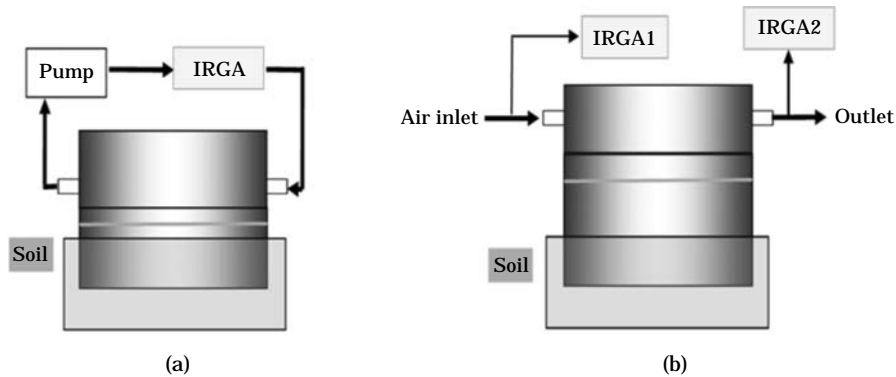


Fig. 1. Methods of soil respiration measurement: (a) a closed dynamic method and (b) an open-flow chamber method (Lee *et al.*, 2010).

통기법 (OF법: open flow method, Fig. 1b)을 이용하기도 하였지만 기기의 복잡성 때문에 현재는 거의 이용되지 않고 있다. 현재 고정 측정구에서 자동측정 장비를 이용하여 연속적으로 토양호흡 자료를 수집하는 방법은 폐회로역학챔버법으로 동양권에 속하는 일본과 중국에서도 널리 보급되어 사용되고 있다. 따라서 방법론 상의 오류를 최소화하기 위해서는 폐회로역학챔버법을 이용한 토양호흡자료 수집이 바람직할 것으로 판단된다.

2) 토양호흡 측정기기 간의 오차

국내에서도 다양한 토양호흡 측정 기기들이 사용되고 있지만 개개의 기기들이 어느 정도의 측정 오차를 가지고 있는지에 대한 검증은 거의 전무한 상태이다. 이러한 검증 부재로 인해 실제로 야외에서 얻어진 값들의 기기에 따른 측정오차 보정은 거의 불가능한 상태이다. 외국의 경우, 이러한 측정 기기 간의 오차를 줄이기 위해 지속적인 노력을 기울여 정확도가 높은 자료를 얻기 위해 노력하고 있다 (Nakadai *et al.*, 1993). 그러한 노력들의 결과를 보면 Nakadai *et al.* (2002)는 밀폐법에 의한 내부의 CO₂ 농도 상승은 대기와 토양의 CO₂ 농도구배의 감소를 야기시켜 토양호흡 속도를 저하시킨다고 보고하였고, Pumpanen *et al.* (2001)은 통기법과 밀폐법을 비교한 실험에서 밀폐법이 통기법에 비해 약 11% 낮은 값으로 측정된다고 하였다. 또한 Liang *et al.* (2003)은 자체 개발한 통기형 자동 챔버에 대하여 밀폐형 챔버와 open-top 챔버 및 토양 CO₂의 농도 경도 시스템에 대한 야외 실험결과에서 자동 개폐 챔버에 대하여 대부분의 시스템들이 과대 평가되는 경향이 있다고 보고하였다.

국내에서도 기기들 간의 오차를 줄이기 위한 노력들이 이루어져 왔는데, Chae *et al.* (2005)는 식물 환경 조절 시스템을 이용한 토양호흡 관측 챔버법의 비교 실험에서

온도영역에 따라 밀폐법과 통기법의 차이가 있음을 지적하였으나 실험이 밀폐환경에서 이루어진 관계로 사람의 호흡으로 발생한 CO₂ 오염으로 유의적인 결과를 얻지 못했다. 한편 Suh *et al.* (2005a)는 야외에서 실시한 통기법, 밀폐법, LI-6400의 상호 비교실험에서 밀폐법이 통기법에 비해 낮은 토양호흡에서는 약 5.2%, 높은 토양호흡에서는 약 15.4% 정도 낮게 측정된다고 보고하였으며, 통기법과 LI-6400과의 비교에서는 유사한 값이 측정되었는데, 이는 LI-6400 챔버 내에 부착된 팬이 CO₂ 확산을 촉진시켜 밀폐법의 에러를 극복하기 때문으로 설명하였다. 이러한 결과들로 볼 때 측정 방법들과 기기들 간에는 경우에 따라 큰 오차를 가져올 가능성이 있으므로 기기들 간의 상호 비교 측정 및 보정 작업은 반드시 필요한 것으로 판단된다.

2. 토양호흡의 환경적 요인

지표면의 식생과 지형적 특징은 토양의 물리화학적 특성에 크게 영향을 주고 그러한 영향은 토양호흡에 반영되어 토양호흡의 시공간적 불균일성을 유발한다 (Tamai, 2010). 토양호흡의 불균일성은 토양권의 탄소수지를 파악하고 기후변화와 같은 환경변화에 대한 탄소수지 변화의 예측 정확도를 저하시키는 주 요인으로 작용하고 있으며, 또한 이러한 토양호흡의 시공간적 불균일성은 다양한 입지환경에 대한 토양호흡 자료를 장기간에 걸쳐 지속적으로 추적해야 하는 이유가 되고 있다 (Suh *et al.*, 2005b). 이를 해소하여 토양호흡 정확도를 높이기 위한 다각적인 연구가 진행되고 있으나 불행히도 국내의 경우, 그 자료의 축적량이 빈약하고 산발적인 상태로 연구가 진행되어 왔다.

1) 공간적 불균일성

토양호흡은 식물의 뿌리와 미생물로부터 나온 호흡의 혼합된 결과물이기 때문에 이들이 각각 여러 환경요인들과 상호작용하며 그 양태에 따라 다양한 조합이 발생하므로 시공간적 변이가 나타나는 것은 자연스러운 현상이다. 토양호흡의 시공간적 불균일성의 가장 주된 이유는 환경조건의 불균일성에 기인한다 (Tamai, 2010). 다양한 연구사이트는 사면 방향이나 경사도, 구성 식물 종 등의 지역적 차이를 반영한 다양한 환경으로 구성되어 있다. 이러한 지형적 차이는 지면에 축적되는 리터량과 토양수분, 식물근의 착근 정도 등 불균일성을 발생시키는 다양한 요인으로 제공된다. 어떤 경우에 있어서는 임관이 노출된 시기에 지면에 부는 강한 바람이 지표면에 쌓인 낙엽을 반대사면으로 이동시켜 지표면 리터축적량을 변화시킨다. 이러한 다양한 환경 하에서 토양호흡이 어떠한 경향을 나타내고 또한 어느 정도의 값이 연구지역의 대표 값이 되는가를 결정하기에는 광범위 지역에 대한 측정을 하지 않고는 해결하기 매우 어려운 과제이다. 이를 위해 관련 연구자들은 연구지역을 격자형으로 구획하여 광범위 지역에 대한 토양호흡 자료를 얻으려 계획하고 있으나 인력 및 장비상의 어려움으로 인하여 적극적으로 추진하지 못하고 있는 실정이다. 하지만 이러한 실정과 무관하게 토양호흡의 공간적 불균일성 문제는 반드시 해결하여야 할 과제이다. 이와는 별도로 시간적 불균일성에 대해서는 현재 정상적으로 운용되고 있는 자동호흡챔버를 통하여 수집되는 자료를 바탕으로 토양호흡의 계절적 변화나 강수와 같은 일시적인 이벤트에 대한 반응, 연변화와 같은 장시간에 대한 토양호흡의 다양한 패턴이 분석되고 있으며, 이를 토대로 토양호흡을 조절하는 요인의 분석이 진행되고 있다.

2) 토양, 식생, 기후적 요인

토양호흡은 식생형, 토양의 종류, 다양한 대 기후적 및 미세 기후적 환경 등의 영향을 받는다. 이러한 요인 중, 토양의 이화학적 특성은 토양호흡 속도에 영향을 주는 매우 중요한 요소이며, 그 이화학적 특성은 토양의 모 재료가 되는 모암의 종류에 더해 그 모암을 기반으로 형성된 식생의 종류에 의해 크게 영향을 받는다. 또한 식생의 종류와 천이의 진행 정도에 따라 낙엽, 낙지와 같은 식물 유래 유기물 형태로 토양에 공급되는 유기물의 양과 질 그리고 이들의 분해율은 다르게 나타나며 (Parker *et al.*, 1983), 그러한 차이가 토양호흡의 속도에 반영된다 (Suh *et al.*, 2005b). 토양에 유입된 식물체 유래의 지상부와 지하부의 유기물질이 미생물을 주로하는 토양생물에 의해

분해되면서 CO₂가 발생되기 때문에 토양호흡은 유기물의 종류와 양에 따라서도 크게 달라진다 (Son and Kim, 1996). 이와 더불어 토양의 온도와 습도, C/N비, 엽면적지수(LAI) 등과 같은 요인에 의해서도 영향을 받는데, 특히 토양의 온도와 수분, 유기물 함량은 토양호흡 속도를 조절하는 가장 중요한 요소로 보고되고 있기 때문에 토양호흡을 측정할 때 이러한 자료를 동시에 수집하는 것은 매우 일반적인 방법이 되고 있다. 많은 연구 발표에서 온대 산림에서의 토양호흡은 지온과 매우 높은 양의 상관관계가 있음이 보고되었고 (Raich *et al.*, 1990), 이러한 상관관계에 따라 온도의 계절 변동성에 수반하여 토양호흡도 계절적인 변화를 동반하는 결과는 많은 연구에서 보고되었다 (Buchmann, 2000). 지온의 일, 연간 변동성은 토양 유기물과 지상부 낙엽 낙지의 무기화와 분해, 뿌리의 활성, 식물의 성장, 생리적 활성에 영향을 줌으로써 토양호흡을 변화시키는 주 요인으로 작용한다 (Suh *et al.*, 2005b). 토양호흡이 지온의 증가와 함께 지수적으로 증가하는 것은 일반적인 사실로 받아들여지고 있으나 (Kucera and Kirkham, 1971), 고온에서는 효소가 비활성화되거나 변성되기 때문에 온도에 대한 민감도는 감소하는 것으로 보고되고 있다 (Fang and Moncrieff, 2001).

Liu *et al.* (2006)은 지온 외에 또 다른 요소로서 토양수분이 토양호흡에 영향을 주는 것으로 인식하고 있다. 토양수분량은 식물의 뿌리와 미생물, 토양의 물리적, 화학적 특성에 직·간접적인 영향을 미침으로써 토양호흡에 영향을 주는 중요한 요소로 작용한다 (Liu *et al.*, 2006). 실제로 많은 연구들을 통해 토양호흡의 계절적 변화와 지온의 변화가 반드시 일치하지는 않는다고 하여 (Son *et al.*, 1994), 지온 외에 또 다른 요소로서 토양수분이 토양호흡에 영향을 주는 것으로 인식되고 있다 (Liu *et al.*, 2002). 일반적으로 토양수분과 토양호흡의 관계는 양의 상관관계에 있는데 (Rout and Gupta, 1989; Epron *et al.*, 1999), 토양수분의 감소는 미생물 활성의 저하 (Lund and Goksoyr, 1980)와 뿌리호흡의 저하 (Burton *et al.*, 1998; Maier and Kress, 2000) 등을 초래하여 토양호흡속도가 감소하게 된다고 보고하고 있다.

3) 토양의 유기물 함량

토양의 유기물 함량은 토양에 유입되는 낙엽, 낙지와 토양층 안에 포함되어 있는 뿌리 등의 영향을 받는다. Witkamp (1996)는 토양호흡량이 낙엽의 분해율과 낙엽의 종류와 유의한 상관관계가 있음을 연구한 바 있다. Fang *et al.* (1998)은 낙엽과 부식질의 양이 토양표면에서 일어나는 미생물 호흡으로 방출되는 토양호흡을 조절하

는 중요한 요인임을 밝혔고, Rout and Gupta (1989)는 낙엽에서 배출되는 토양호흡량이 전체 토양 호흡에서 6~28% 정도를 차지한다고 보고하였다.

토양호흡과 환경요인과의 상관관계 규명은 환경변화에 따른 토양탄소 동태 예측 및 파악에 중요한 핵심이 되지만, 야외조사의 경우, 토양호흡에 영향을 주는 다양한 환경요인의 복잡한 과정과 수많은 경우의 수로 인하여 환경변화에 따른 토양호흡변화 예측이 매우 어려운 실정이다. 이를 위하여 야외의 동일한 토양을 채취한 후, 환경요인을 인위적으로 제어할 수 있는 실내실험을 야외실험과 병행하여 보다 면밀한 토양호흡과 환경요인과의 상관관계를 규명하여야 할 것으로 사료된다.

3. 토양호흡의 gap filling

토양호흡의 일 단위 연속 관측이 어려운 경우, 연간 탄소 방출량의 추정에는 토양호흡 발생에 영향을 주는 조절인자와의 관계를 이용한다. 일반적인 조건에서 토양호흡 속도를 조절하는 가장 중요한 인자는 토양 온도이다. 따라서 토양 온도와 토양 호흡량의 비선형적인 지수 함수 관계식을 이용하여 얻어진 계수를 통해 누락된 값을 추정할 수 있다. 산림 생태계의 일반적인 결과에서 토양 호흡과 토양 온도의 상관관계는 상당히 높은 편 ($r^2=0.8\sim 0.9$)이므로 간단한 온도 지수 함수식(식 1)을 많이 사용한다 (Lloyd and Taylor, 1994). 그러나 이러한 비선형 관계식들은 관측 자료의 특성에 따라서 조금씩 변형되기도 한다(식 2, Rayment and Jarvis, 2000; Fang and Moncrieff, 2001). 이 밖에도 activation energy 개념이 도입된 Arrhenius 형식의 다양한 식들이 있다(식 3, Fang and Moncrieff, 2001). 토양 온도만을 함수로 하는 경우에는 이러한 식들을 이용하여 관측 자료에 타당한 계수를 도출하여 호흡량을 계산한다.

최근에는 가뭄 및 강수의 특성에 따라서 토양호흡 발생에 직접적으로 영향을 주는 토양 수분의 역할이 대두되고 있다. 가뭄 동안에 제한된 토양 수분은 토양호흡량을 억제하고, 강수 현상으로 증가된 토양 수분은 호흡량을 증가시켜, 이산화탄소 방출량에 적지 않은 영향을 미친다. 이에 대한 예로 Yuste *et al.* (2005)에서는 가뭄이 있는 조건에서 강수량, 강수 직후의 경과 시간, 수증기압의 차이(포차)를 변수로 한 rewetting 지수를 정의하여 사용하였다. 또한 여기에서 사용된 gap filling 식은 연간 측정된 토양 위의 미세한 리터(litter)양을 나타내는 계절성 지수(index of seasonality)를 도입하여, 토양 온도 이외에 토양 수분량의 정도와 rewetting 조건에 따라 토

양호흡량을 조절하여 계산할 수 있도록 1) 일반적인 경우, 2) 가뭄 기간, 3) rewetting 등을 기상 조건에 따라 구분하였다. 관측지의 식생과 기후 조건에 따라 관련된 변수를 추가하여 보정된 모형은 토양호흡의 시간적인 변화(temporal variability)를 92~94% 설명하고 있다(Yuste *et al.*, 2005). 또 다른 유사한 식에는 토양 온도와 토양 수분 이외에 엽면적 지수까지 포함한 식도 있다(식 4, Norman *et al.*, 1992).

또한 관측 결과를 이용한 관계식이 아닌, 생태 모형을 이용하여 토양호흡을 계산할 수 있다. 이러한 생태 모형으로 생태계 전체 탄소 수지 계산이 포함되어 토양호흡을 모사할 수 있는 Biome-BGC가 널리 사용되고 있다(Hibbard *et al.*, 2005). Biome-BGC의 토양호흡 계산은 자가 호흡과 타가 호흡을 각각 계산하여 자가 호흡 중 뿌리 호흡과 타가 호흡의 합으로 구해진다. 타가 호흡은 기질의 질, 토양 수분과 토양 온도의 함수로 계산되며 가뭄을 고려하여 계산한다. Grosso *et al.* (2005)는 낮은 온도 범위의 풍부한 토양 호흡 관측 자료를 활용하여, 더욱 일반적으로 사용할 수 있도록 CENTRY 모형에서 사용하는 타가 호흡 sub-model을 수정하였다. 수정된 내용은 토양 온도와 토양 수분 함량을 arctangent식으로 표현하여 타가 호흡의 계산을 개선시켰다. 이러한 생태 모형을 사용할 경우 단순히 토양 호흡 값뿐만 아니라 NPP(Net Primary Production) 및 GPP(Gross Primary Production) 등을 파악하여 생태계 전반에서 토양 호흡이 차지하는 부분과 역할을 이해할 수 있고, 생태계 전체의 탄소 수지를 파악하는 데 도움이 된다.

실시간 관측 시 시스템의 문제로 누락된 자료나 연속적인 관측이 어려울 때, 관계식에서 사용되는 관련된 변수들을 병행하여 관측한다면 보다 정확한 추정이 이루어질 수 있을 것이다. 또한 관측값을 이용한 관계식을 이용할지 또는 일반적인 생태 모형을 사용할지는 공간적인 규모와 분석 목적에 맞게 적용해야 할 것이다.

* 비선형 지수 함수식

$$R_s = ae^{bT} \quad (1)$$

R_s : 토양 호흡, T : 토양 온도, a, b : 계수

$$R_s = R_{s,av} e^{k(T - T_{s,av})} \quad (2)$$

R_s : 토양 호흡, $R_{s,av}$: 평균 R_s ,

T_s : 토양 온도, $T_{s,av}$: 평균 토양 온도

* Arrhenius 식

$$R_s = a \exp\left(\frac{E}{R(T_s + 273.2)} - \frac{T_s - 10}{283.2}\right) \quad (3)$$

R_s : 토양호흡, T_s : 토양 온도, E : activation 에너지,
 R : 기체상수 (8.3 J mol^{-1}), a : coefficient

* 토양 수분, 엽면적 지수가 포함된 비선형 지수 함수식

$$R_s = a_{R_{soil}}(0.135 + (0.054 Lg))(100 W_{10cm}) e^{0.069(T_{s10cm} - 25.0)} \quad (4)$$

R_s : 토양호흡, T_s : 토양 온도,
 $a_{R_{soil}}$: 토양 호흡의 임의의 규모 인자,
 Lg : 녹색 엽면적 지수,
 W_{10cm} : 10 cm 깊이의 토양 수분의 부피,
 T_{s10cm} : 10 cm 깊이의 토양 온도

4. 토양호흡의 발생원 별 구분

산림생태계의 탄소 순환 연구에서 토양호흡은 그 순환의 양과 특성을 구명하는 기초 요소가 되며 (Ryan and Law, 2005), 생태계에서 식생은 탄소의 흡수 요소인 반면, 토양호흡은 발생 요소로서의 구성인자로 취급된다. 하지만 토양호흡이 미생물호흡과 식물의 뿌리호흡이 총합으로 구성되기 때문에 구성요소를 면밀히 살펴보면 미생물의 발생원 기원이면서 동시에 식물의 흡수원 기원이기도 하다. 이러한 이유로 토양호흡만의 측정 자료만으로는 어떤 생태계의 탄소수지를 평가하고 그 메커니즘을 밝히는 데 한계가 있다. 생산자인 식물의 광합성량과 호흡량의 측정치를 바탕으로 총광합성량과 순일차생산량을 산정하기 위해서는 호흡량 정량이 반드시 필요하다 (Lee, 2003). 지상부의 경우 다른 요소와 혼합되어 있지 않기 때문에 비교적 간단히 호흡량의 정량이 가능하지만 뿌리의 경우, 토양과 토양이 가지는 환경요소와 상호관계를 가지며 CO_2 를 방출하기 때문에 그 양을 정량하는 것은 간단한 문제가 아니다. 이러한 상황에서 많은 연구자들은 토양호흡, 뿌리호흡, 미생물호흡을 측정하고 환경인자와의 상관관계를 밝히는 데 노력을 집중하였다 (Aanderud et al., 2013). 이러한 연구 결과는 토양호흡이 변화하는 경우 그 구성 인자의 양적 관계가 어떻게 변화하여 반영되고, 그러한 변화가 어떤 환경요인의 변화에서 비롯되는지를 파악함으로써 원인을 이해하고 분석하는 데 매우 중요하게 사용된다. Hanson et al. (2000)은 여러 연구 결과로부터 뿌리호흡이 토양호흡의 10~90% 정도의 범위

를 차지한다고 보고하였다.

발생원 별 토양호흡량을 측정하는 방법으로는 토양호흡의 구성 요소를 직접 측정하는 방법, 뿌리를 제거한 지역과 제거하지 않은 지역의 토양호흡을 비교하는 방법 (Ryan and Law, 2005), 동위 원소를 이용하는 방법 등이 있다 (Hanson et al., 2000). 토양호흡의 구성 요소에 대한 직접적 측정방법은 일반적으로 토양 중에 있는 뿌리를 캐내어 일정한 기기를 이용 직접 토양호흡을 측정하는 방법 (Burton et al., 2002), 뿌리를 그대로 두고 주위의 토양을 제거한 후, 유기물이 포함되지 않은 토양을 다시 채운 후 토양호흡을 측정하는 방법 등이 시도되고 있다. 발생원에 대한 양적 자료를 정확하게 구분할 수 있는 장점이 있으나 뿌리의 중요한 토양환경 요소가 배제되고 뿌리의 선별과정에서 뿌리호흡에 높은 기여를 하는 중요한 미세균이 유실되는 등 (Larionova et al., 2005) 실제로 자연적인 환경에서의 값과 어느 정도의 오차를 가지고 있는지 검증이 필요하지만 현실적으로 자연적인 환경에서의 참값을 알 수 없기 때문에 검증에는 한계가 있다. 이러한 제한 요건이 많은 이유로 실제로 연구된 결과가 발표된 것은 많지 않다.

한편 방사선 동위원소인 ^{14}C 를 광합성 과정에 유입시킨 후 뿌리로부터 발생하는 양을 측정하는 방법 (Cheng et al., 1993), 발생하는 물질의 기원이 다른 탄소안정 동위원소인 ^{13}C 와 ^{12}C 의 발생비율의 정량을 통한 뿌리호흡량 산정 (Cheng, 1996) 역시 시료 채취와 정제, 법적인 제약 등의 어려움과 그 어려움에 비해 상대적으로 낮은 자료 수율로 인해 실제적으로는 매우 제한된 연구만이 성과를 내고 있다. 이와 같은 제한에 의해 현재까지 가장 널리 이용되어 온 방법은 임상의 토양 내에서 직접 뿌리를 제거하거나 뿌리의 기능을 무력화시키는 방법이 사용되었다. 이러한 방법들은 뿌리호흡량을 직접 측정하기 보다는 뿌리의 역할이 없는 조건을 만들어 미생물호흡량을 측정하고 뿌리가 있는 부분에서 측정한 값과 비교하여 뿌리호흡량을 산정하는 원리이다. 이를 위한 뿌리제거 방법으로는 측정지역의 토양을 파내면서 그곳에 포함되어 있는 뿌리를 완전히 제거한 후 미생물호흡을 측정하는 방법이 이용되는데 (root removal method), 이 방법은 뿌리를 완전히 제거할 수 있는 장점이 있으나 토양을 교란시키는 요소가 혼입되기 때문에 토양교란에 대한 영향 평가로 보정이 필요한 단점이 있다.

다음으로 토양교란을 줄이는 방법으로 식물의 밀도가 적은 지역을 선정하여 지상부에 남아있는 식물을 베어내고 제초제와 같은 약품을 처리하여 고사시키는 방법이 있으나, 오히려 살충제에 의한 역 효과가 예상되어 널리

이용되지는 않고 있다 (Nakane *et al.*, 1983). 다음으로 뿌리호흡을 정량하는 데 가장 많이 이용되는 방법은 일정한 구역의 둘레를 뿌리가 들어간 깊이까지 파내며 뿌리를 단근처리한 후 재차 뿌리가 침입하지 않도록 뿌리 침입 방지판을 설치하는 단근법 (trenching method)이다. 하지만 단근법도 단근된 지역의 토양수분 변화, 특히 단근처리 후 시간 경과에 따라 잘려진 뿌리의 분해에 따른 호흡의 기여도 산정이 매우 중요하다. 이를 위해 단근처리 시 수집되는 뿌리를 수거하여 별도로 분해율을 조사하여 단근처리된 지역의 죽은 뿌리의 기여도를 산정하여 사용하기도 한다. 현재 단근법은 뿌리호흡량을 정량하는 방법으로 가장 널리 이용되는 방법이다. 이미 국내에서도 단근법을 이용한 발생원별 토양호흡량의 연구가 진행되고 있으며 가까운 시일 내 관련 자료가 발표될 것으로 기대되고 있다.

결 론

국내에서 적용되는 토양호흡 방법과 측정 예를 정리 보고한 논문에 따르면 국내의 토양호흡 연구는 침엽수, 혼합림, 과수원, 농경지 등 다양한 식생에서 수행되었으며, 우점종 차이에 따른 탄소수지와 토지 이용 형태에 의한 토양 탄소수지에 관한 연구의 일환으로 토양호흡을 측정된 경우와 같이 부수적으로 토양호흡을 측정된 경우와 토양호흡의 계절적 변동 파악 연구, 발생원 별 토양호흡, 임목의 밀도가 토양호흡에 미치는 영향, 유기물, 탄화물 및 무기질소 첨가가 토양호흡에 미치는 영향, 벌채 및 산불이 토양호흡에 미치는 영향 등 토양호흡에 영향을 미치는 물리 화학적 요인에 관한 연구 등의 결과 등으로 정리되어 있다 (Lee *et al.*, 2010). 이와 같이 국내에서도 토양호흡 분야에서 다양한 연구가 진행되고 있지만 연구의 대부분은 산림에 국한되어 있으며 과수원, 농경지, 초지, 수변 등에 관한 연구는 매우 제한적인 상태이다. 국내의 토양호흡 자료는 주로 산림의 토양호흡에 편중되어 있어 전체적인 국내 생태계 전반에 걸친 탄소수지 평가를 위해서는 산림생태계 이외의 생태계에 대한 자료수집이 진행되어야 할 것으로 생각되며, 더불어 연간의 토양호흡 값과 같은 단순한 측정을 지양하고 온도, 수분, 리터층 발달, 사면방향, 경사, 암석 노출지, 토성, 토심, 생태 교란지, 유기물함량 변화 등 토양호흡에 영향을 주는 요인들의 차이에 따른 토양호흡 특성을 파악할 수 있는 자료 축적이 요구된다. 이러한 자료 수집을 위해서는 생태계 내외에서의 인위적 조절 실험과 더불어 해당 지역에서의

장기간 측정을 통한 자료 축적으로 통해 시공간적인 요소의 변화와 토양호흡과의 관계에 대한 자료가 축적되어야 할 것으로 보인다. 그러한 의미에서 산림청과 환경부 등에 의해 진행되고 있는 장기생태연구 항목에 토양호흡이 포함되어 있는 것은 매우 다행스러운 것이라 볼 수 있다. 이러한 연구 중, 산림과학원의 광릉 장기생태조사지에서는 다양한 분야의 많은 국내 연구자들이 집중적으로 탄소순환을 관측하고 있는 연구 사이트이기 때문에 탄소 수지에 관여하는 다양한 요인의 측정값들과 상호 비교하여 새로운 결과를 얻기에 매우 적절한 곳이다. 토양분야에서는 수문 및 생태, 미기상 분야들과 호흡을 맞추어 밀폐법을 기초로 한 자동 개폐형 챔버를 설치하여 24시간 연속적인 값을 수집하고 있다. 지표면으로부터 직접적으로 방출되는 토양호흡뿐만 아니라 토양권 탄소 수지에 영향을 주는 리터 생산량 및 분해속도, 또한 당해년도 공급된 리터가 다음 년도의 토양호흡속도에 어느 정도 영향을 미치는지 미치는 정도, 토양온도와 습도, 임상도달 강우량 등의 요인들에 대한 자료들에 대한 주기적 또는 연속적 자료를 수집하고 있다. 하지만 토양권에 대한 이와 같은 집중적인 관측에도 불구하고 토양권의 탄소 동태를 파악하기 위하여는 여전히 많은 노력들과 해결해야 할 과제들이 남아 있다. 이러한 자료 수집과 더불어 토양호흡 측정에 상존하는 문제점을 해소하고 고품질의 자료를 얻기 위한 노력이 동시에 그리고 지속적으로 행해질 필요가 있다.

적 요

육상생태계의 토양에는 대기의 약 2배에 해당하는 많은 양의 탄소를 가지고 있으며, 기후변화에 의한 기온 상승으로 대기로의 방출에 매우 취약한 상황에 놓여 있다. 한반도의 육상 생태계 토양탄소 수지의 변화예측을 위해 필연적으로 요구되는 다양한 생태계의 토양호흡 자료 수집을 위해 이용되는 방법론, 기기, 기기들 간의 오차, 시공간적인 불균일성, 결측 자료에 대한 보충 (gap filling), 발생원 별 구분 등에 대한 현 상황을 정리하고 그를 바탕으로 국내 토양호흡 연구의 문제점과 과제에 대해 고찰하였다. 결론적으로 국내의 토양호흡 연구는 기기 간 또는 방법들 간의 오차 보정이나 노력들이 매우 빈약하게 행해져 왔기 때문에 과거 및 현재 측정되는 자료의 품질은 거의 보정되지 않은 상태로 볼 수 있다. 이러한 문제점들이 해소되지 않고 지금까지와 같은 방식으로 토양호흡 자료가 축적된다면 그 활용성은 매우 낮을 수 밖

에 없다. 또한 장기적인 자료 축적, 토양호흡 조절 메커니즘에 관한 조절 실험, 다양한 생태계, 토성, 토심 등에 대한 자료 역시 장래의 토양권 탄소 동태 변화를 모델 수단으로 예측하는 데에는 매우 중요한 요소이므로 토양호흡 자료 수집과 함께 수집되어야 할 것이다. 더불어 장기적인 측면에서 이러한 문제들이 연구자 간에 깊숙이 인식되어 보다 양질의 자료가 생산되도록 노력할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2010년도 건국대학교 지원에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

- Aanderud, Z.T., S.E. Jones, D.R. Schoolmaster Jr., N. Fierer and J.T. Lennon. 2013. Sensitivity of soil respiration and microbial communities to altered snowfall. *Soil Biology & Biochemistry* **57**: 217-227.
- Buchmann, N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry* **32**: 1625-1635.
- Burton, A.J., K.S. Pregitzer, G.P. Zogg and D.R. Zak. 1998. Drought reduces root respiration in sugar maple forests. *Ecological Application* **8**: 771-778.
- Burton, A.J., K.S. Pregitzer, R.W. Ruess, R.L. Hendrick and M.F. Allen. 2002. Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia* **131**: 559-568.
- Chae, N.Y., R.H. Kim, S.U. Suh, T.H. Hwang, J.S. Lee, Y.H. Son, D.W. Lee and J. Kim. 2005. Intercomparison experiment of chamber methods for soil respiration measurement using on phytotron System. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(1): 107-114.
- Cheng, W. 1996. Measurement of rhizosphere respiration and organic matter decomposition using natural ^{13}C . *Plant & Soil* **183**: 263-268.
- Cheng, W.D., C. Coleman, C.C. Carrol and C.A. Hoffman. 1993. In situ measurement of root respiration and soluble C concentrations in the rhizosphere. *Soil Biology & Biochemistry* **25**: 1189-1196.
- Del Grosso, S.J., W.J. Parton, A.R. Mosier, E.A. Holland, E. Pendall, D.S. Schmel and D.S. Ojima. 2005. Modeling soil CO_2 emission from ecosystems. *Biogeochemistry* **73**: 71-91.
- DOE. 1999. Carbon sequestration. State of the science. US Department of Energy (DOE), Washington, DC.
- Epron, D., L. Farque, E. Lucot and P.M. Badot. 1999. Soil CO_2 efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Annual Forest Science* **56**: 221-226.
- Fang, C. and J.B. Moncrieff. 2001. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry* **33**: 155-165.
- Fang, C., J.B. Moncrieff, H.L. Gholz and K.L. Clark. 1998. Soil CO_2 efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil* **205**: 135-146.
- Hanson, P.J., N.T. Edwards, C.T. Garten and J.A. Andrews. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* **48**: 115-146.
- Hibbard, K.A., B.E. Law, M. Reichsteine and J. Sulzman. 2005. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry* **73**: 29-70.
- IGBP. 1998. Terrestrial carbon working group. The terrestrial carbon cycle. Implications for the Kyoto protocol. *Science* **280**: 1393-1394.
- Kirita, H. 1971. Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions. IV. An improved absorption method using a disc of plastic sponge as absorbent holder. *Japan Journal of Ecology* **21**: 230-244. (in Japanese with English abstract)
- Kucera, C.L. and D.R. Kirkham. 1971. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecology* **52**: 912-915.
- Larionova, A.A., D.V. Saprionov, V.O. Lopes de Gerenyu, L.G. Kuznetsova and V.N. Kudeyarov. 2005. Contribution of Rhizomicrobial and Root Respiration to the CO_2 Emission from Soil (A Review). *Soil Biology* **7**: 842-854.
- Lee, E.H., J.H. Lim and J.S. Lee. 2010. A review on soil respiration measurement and its application in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**(4): 264-276.
- Lee, M.S. 2003. Method for assessing forest carbon sinks by ecological processing-based approach-a case study for Takayama station, Japan. *The Korean Journal of Ecology* **26**: 289-296.
- Liang, N., G. Inoue and Y. Fujinuma. 2003. A multi-channel automated chamber system for continuous measurements of forest soil CO_2 efflux. *Tree Physiology* **23**: 825-832.
- Liu, Q., N.T. Edwards, W.M. Post, L. Gu, J. Ledford and S. Lenhart. 2006. Temperature-independent diel variation

- in soil respiration observed from a temperate deciduous forest. *Global Change Biology* **12**: 2136-2145.
- Liu, X., S. Wan, B. Su, D. Hui and Y. Luo. 2002. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil* **240**: 213-223.
- Lloyd, J. and J.A. Taylor. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* **8**: 315-323.
- Lund, V. and J. Goksoyr. 1980. Effects of water fluctuations on microbial mass and activity in soil. *Microbial Ecology* **6**: 115-123.
- Maier, C.A. and L.W. Kress. 2000. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal of Forest Resource* **30**: 347-359.
- Nakadai, T., H. Koizumi, Y. Usami, M. Satoh and T. Oikawa. 1993. Examination of the method for measuring soil respiration in cultivated land: Effect of carbon dioxide concentration on soil respiration. *Ecological Research* **8**: 65-71.
- Nakadai, T., M. Yokogawa, H. Ikeda and H. Koizumi. 2002. Diurnal changes of carbon dioxide flux from bare soil in agricultural field in Japan. *Application of Soil Ecology* **19**: 161-171.
- Nakane, K., M. Yamamamoto and T. Hiroyuki. 1983. Estimating root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Japanese Journal of Ecology* **33**: 397-408.
- Norman, J.M., R. Garcia and S.B. Verma. 1992. Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of a grassland. *Journal of Geophysical Research* **97**(D17): 845-18,853.
- Parker, L.W., J. Miller, Y. Steinberger and E.G. Whitford. 1983. Soil respiration in a Chihuahuan desert rangeland. *Soil Biology & Biochemistry* **15**: 303-309.
- Pumpanen, J., H. Ilvesniemi, P. Keronen, A. Nissnen, T. Pohja, T. Vesala and P. Hari. 2001. An open chamber system for measuring soil surface CO₂ efflux; Analysis of error source related to the chamber system. *Journal of Geophysical Research* **106**: 7985-7992.
- Raich, J.W., R.D. Bowden and P.A. Steudler. 1990. Comparison of two static chamber techniques for determining carbon dioxide efflux from forest soils. *Soil Science Society American Journal* **54**: 1754-1757.
- Rayment, M.B. and P.G. Jarvis. 2000. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry* **32**: 35-45.
- Rout, S.K. and S.R. Gupta. 1989. Soil respiration in relation to abiotic factors, forest floor litter, root biomass and litter quality in forest ecosystems of Siwaliks in northern India. *Acta Oecologica* **10**: 229-244.
- Ryan, M.G. and B.E. Law. 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry* **73**: 3-27.
- Saigusa, N., S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo and N. Nishimura. 2002. Gross primary production and net ecosystem production of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology* **112**: 203-215.
- Son, Y.H., G. Lee and J.Y. Hong. 1994. Soil carbon dioxide evolution in three deciduous tree plantations. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **27**(4): 290-295.
- Son, Y.H. and H.W. Kim. 1996. Soil respiration in *Pinus rosgoda* and *Larix leptolepis* plantation. *Journal of Korean Forest Society* **85**: 496-505.
- Suh, S.U., Y.M. Chun, N.Y. Chae, J. Kim, J.H. Lim, M. Yokozawa and J. Lee. 2005a. A chamber system with automatic open and closing for continuously measuring soil respiration based on an open-flow dynamic method. *Ecological Research* **21**: 406-414.
- Suh, S.U., Y.K. Min and J.S. Lee. 2005b. Seasonal variation of contribution of leaf-litter decomposition rate in soil respiration in temperate deciduous forest. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(1): 57-65.
- Tamai, K. 2010. Effects of environmental factors and soil properties on topographic variations of soil respiration. *Biogeoscience* **7**: 1133-1142.
- Waring, R.H. and S.W. Running. 1998. Forest ecosystem. Analysis at multiple scale. Academic Press, pp. 67.
- Witkamp, M. 1966. Decomposition of leaf litter in relation to environment, microflora and microbial respiration. *Ecology* **47**: 194-201.
- Yuste, J., I. Curiel, A. Janssens and R. Cuelemans. 2005. Calibration and validation of an empirical approach to model soil CO₂ efflux in a deciduous forest. *Biogeochemistry* **73**: 209-230.

(Manuscript received 5 June 2013,

Revised 11 June 2013

Revision accepted 12 June 2013)