

## 다중채널 자동챔버시스템에 의한 삼림토양의 이산화탄소 유출량의 연속측정

# The Continuous Measurement of CO<sub>2</sub> Efflux from the Forest Soil Surface by Multi-Channel Automated Chamber Systems

주승진<sup>1\*</sup> · 임명희<sup>2</sup> · 주재원<sup>2</sup> · 원호연<sup>3</sup> · 진선덕<sup>4</sup>

<sup>1</sup>대기환경모델링센터 센터장, <sup>2</sup>대기환경모델링센터 선임연구원, <sup>3</sup>국립생태원 보전평가연구본부 연구원, <sup>4</sup>국립생태원 보전평가연구본부 선임연구원

Seung Jin Joo<sup>1\*</sup>, Myeong Hui Yim<sup>2</sup>, Jae-Won Ju<sup>2</sup>, Ho-yeon Won<sup>3</sup> and Seon Deok Jin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Director, Center for Atmospheric and Environmental Modeling, Seoul 08375, Korea

<sup>2</sup>Senior Researcher, Center for Atmospheric and Environmental Modeling, Seoul 08375, Korea

<sup>3</sup>Researcher, National Institute of Ecology, Seoecheon 33657, Korea

<sup>4</sup>Senior Researcher, National Institute of Ecology, Seoecheon 33657, Korea

Received 27 December 2020, revised 14 January 2021, accepted 15 January 2021, published online 31 March 2021

**ABSTRACT:** Multichannel automated chamber systems (MCACs) were developed for the continuous monitoring of soil CO<sub>2</sub> efflux in forest ecosystems. The MCACs mainly consisted of four modules: eight soil chambers with lids that automatically open and close, an infrared CO<sub>2</sub> analyzer equipped with eight multichannel gas samplers, an electronic controller with time-relay circuits, and a programmable logic datalogger. To examine the stability and reliability of the developed MCACs in the field during all seasons with a high temporal resolution, as well as the effects of temperature and soil water content on soil CO<sub>2</sub> efflux rates, we continuously measured the soil CO<sub>2</sub> efflux rates and micrometeorological factors at the Nam-san experimental site in a *Quercus mongolica* forest floor using the MCACs from January to December 2010. The diurnal and seasonal variations in soil CO<sub>2</sub> efflux rates markedly followed the patterns of changes in temperature factors. During the entire experimental period, the soil CO<sub>2</sub> efflux rates were strongly correlated with the temperature at a soil depth of 5 cm ( $r^2 = 0.92$ ) but were weakly correlated with the soil water content ( $r^2 = 0.27$ ). The annual sensitivity of soil CO<sub>2</sub> efflux to temperature ( $Q_{10}$ ) in this forest ranged from 2.23 to 3.0, which was in agreement with other studies on temperate deciduous forests. The annual mean soil CO<sub>2</sub> efflux measured by the MCACs was approximately 11.1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>. These results indicate that the MCACs can be used for the continuous long-term measurements of soil CO<sub>2</sub> efflux in the field and for simultaneously determining the impacts of micrometeorological factors.

**KEYWORDS:** CO<sub>2</sub> efflux, Forest soil, Multi-channel automated chamber systems,  $Q_{10}$ , *Quercus mongolica*

**요약:** 삼림 생태계에서 토양 CO<sub>2</sub> 유출량의 연속적인 모니터링을 위한 다중채널 자동챔버시스템 (MCACs)을 개발하였다. MCACs는 자동개폐 덮개가 있는 8개의 토양챔버, 8개의 다중채널 가스샘플러를 장착한 적외선 CO<sub>2</sub> 농도 분석기, 시간 릴레이 회로를 갖춘 전자 컨트롤러, 프로그래밍이 가능한 로직용 자료수집장치로 구성되었다. 사계절 장기간에 걸쳐 야외 현장에서 MCACs의 안전성과 신뢰도를 조사하고, 높은 시간분해능으로 현장 테스트에서 얻은 온도와 토양수분 함량이 토양 CO<sub>2</sub> 유출에 미치는 효과들을 파악하기 위해, 2010년 1월부터 12월 사이의 기간 동안 남산의 신갈나무림 실험지소에서 MCACs를 사용하여 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도와 미기상 요인들을 지속적으로 측정하였다. 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도의 일변화 및 계절적인 변화는 현저하게 온도 요인의 경향을 따랐다. 전체 실험 기간 동안에 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도는 5 cm 깊이의 토양온도와 밀접한 상관관계 ( $r^2 = 0.92$ )를 보였으나

\*Corresponding author: joo.seungjin@yahoo.co.kr, ORCID 0000-0003-4760-156X

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

토양수분 함량과는 약한 상관관계 ( $r^2 = 0.27$ )를 나타냈다. 남산 신갈나무림에서 온도에 대한 토양 CO<sub>2</sub> 유출량의 연간 민감도 ( $Q_{10}$  수치)는 2.23~3.0의 범위에 달했고, 다양한 온대지역의 낙엽활엽수림에 대한 다른 연구들과 일치하였다. MCACs에 의해 측정된 연평균 토양 CO<sub>2</sub> 유출량은 약 11.1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이었다. 이 결과들은 MCACs가 야외 현장에서 토양 CO<sub>2</sub> 유출량의 연속적인 장기측정과 동시에 미기상 요인들의 영향을 결정하는데 유용한 시스템임을 나타낸다.

**핵심어:** CO<sub>2</sub> 유출, 삼림토양, 다중채널 자동채버시스템,  $Q_{10}$ , 신갈나무

## 1. 서론

육상 생태계의 약 30 - 40%를 점유하고 있는 삼림은 지구규모의 탄소순환과 탄소수지 모델에 있어서 핵심적인 구성요소이며 기후시스템에 있어서 중대한 역할을 가진다 (Wigley and Schimel 2000, IPCC 2001, 2007). 삼림 생태계의 다양한 식생 군락들은 광합성을 통하여 대기 중의 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>)를 흡수하고 생체 내에 유기탄소 화합물의 형태로 저장시키며 성장한다. 또한 식생들의 자가호흡작용과 삼림의 임상에 공급되는 지상부의 낙지엽 및 지하부의 뿌리에 기인한 다양한 형태의 유기부산물들은 토양미생물과 토양동물의 분해 및 분쇄 작용을 거쳐 최종적으로 CO<sub>2</sub>를 토양표면으로부터 발생시킨다 (Dixon et al. 1994, Fang et al. 2005). 이러한 대기와 삼림 생태계 사이의 CO<sub>2</sub> 흡수 및 배출의 유동 속도는 매우 커서 (Saigusa et al. 2002), 최근의 급격한 지구 온난화 및 이상 기후변동과 더불어 대기 CO<sub>2</sub>의 불균형에 의한 지구 탄소순환 및 탄소수지에 교란을 발생시키며 결과적으로 삼림 생태계 고유의 역할과 기능에 심각한 악영향을 초래할 것이다 (Oikawa 1990, Nakane 2001).

삼림 토양표면에서 대기로 발생되는 토양 CO<sub>2</sub>의 유출속도 (soil CO<sub>2</sub> efflux rate)는 일반적으로 생물학적 대사활성의 지표 (Landsberg and Gower 1997)인 토양 호흡 (soil respiration)으로 결정된다 (Luo and Zhou 2006). 토양호흡은 주로 토양 내의 미생물이 낙엽, 낙지, 뿌리 등의 식물 사체와 토양 속의 유기물을 분해하는 미생물호흡 (heterotrophic respiration)과 성장하는 식물뿌리 자체의 유기호흡과 함께 공생하는 균근의 호흡을 합한 뿌리호흡 (root respiration)으로 구성된다 (Hanson et al. 2000, Jassal and Black 2006).

매년, 대기 CO<sub>2</sub>의 약 10%가 토양호흡으로부터 자연 발생되며 이 양은 화석연료 소비에 의한 CO<sub>2</sub>의 배출량보다 약 10배 이상이 된다 (Raich and Schlesinger 1992,

IPCC 2007). 특히, 온대지역의 삼림 생태계 내에서 토양호흡에 의해 발생하는 CO<sub>2</sub> 양은 전체 생태계호흡에 의해 발생하는 CO<sub>2</sub>의 약 60 - 90%가 된다 (Law et al. 2001). 이처럼 토양호흡에 의한 CO<sub>2</sub> 발생량은 지구 탄소순환에서 두 번째로 큰 플럭스 (flux)이자 대기 CO<sub>2</sub>의 주요한 공급원이 되고 있다 (Hanson et al. 2000, Bond-Lamberty et al. 2004). 따라서 토양호흡에 대한 정량적인 모니터링 측정과 평가는 기후변화와 대기 CO<sub>2</sub>의 농도변화를 예측하는데 있어서 필수불가결한 요소가 될 뿐만 아니라, 삼림 생태계의 탄소순환 동태를 파악하는데 있어서 결정적인 요소가 된다.

토양호흡은 식생의 유형과 토양의 물리·화학적 성질에 따라 크게 영향을 받는데 (Nakane 2001), 토양호흡 속도는 생물적 요소인 토양생물군의 활성 및 생물량 뿐만 아니라 기온, 습도, 토양온도, 토양수분, 강수량, 풍속, 일사량 그리고 토양유기물 함량과 같은 비생물적 요소에 의해 영향을 받는다 (Buchmann 2000, Fang et al. 2005). 토양온도의 상승은 토양미생물의 활성 및 식물뿌리의 성장을 촉진시켜 토양으로부터의 CO<sub>2</sub> 발생을 증가시키고 (Lloyd and Taylor 1994, Davidson et al. 1998), 한편, 건조한 환경조건하에서 토양수분의 증가는 토양미생물의 활성에 더 좋은 조건을 제공하여 토양호흡의 속도를 향상시킨다 (Borken et al. 2006). 그러므로 토양호흡을 정량적으로 평가하기 위해서는 어떤 특정지역의 삼림 생태계를 구성하는 식생분포, 토양성분, 생물적·비생물적 요인들의 특성을 파악하고 이들의 상호작용들을 종합적으로 이해하여야 한다 (Raich and Schlesinger 1992, Davidson et al. 1998). 특히 기온, 토양온도 그리고 토양수분과 같은 주요 미기상 요인들은 토양호흡 속도에 주는 그 영향력이 매우 크기 때문에 장기간의 지속적인 모니터링 측정을 통한 명확한 상호관계를 규명해야만 앞으로 미래의 지구 온난화 및 기후·기상 변동에 따른 삼림 생태계의 토양 CO<sub>2</sub> 유출량을 산정하고 예측할 수 있다 (Cox et al. 2000, Luo and

Zhou 2006).

최근 우리나라에서 토양호흡에 관련된 연구들의 대부분은 일부 특정한 삼림지역에 국한되어 있으며 다양한 식생의 유형 및 토지이용 강도에 따른 복합적인 연구는 매우 부족한 상태이다 (Chae et al. 2003, Kang et al. 2003, Suh et al. 2005). 또한 연구 기간도 1년 미만으로 단기적일 뿐만 아니라 측정 빈도도 매월 1-2회 그리고 낮 시간 동안에 약 4시간 미만의 측정이 이루어져 (Moon 2004, Yi et al. 2005, Lee et al. 2012) 환경 및 미기상 요인들의 변화에 따른 생태계 토양호흡의 상세한 시·계열 변화의 특성을 파악하고 이해하기가 어려운 실정이다 (Liang et al. 2004). 한편, 장기적이고 연속적인 CO<sub>2</sub> 플럭스 및 미기상의 모니터링 관측을 위한 타워를 사용하여 에디코브산법 (eddy covariance method) 으로 30분 평균의 면밀한 시간분해능 값을 나타내는 삼림의 CO<sub>2</sub> flux 및 CO<sub>2</sub> 교환수지 분석자료들 (Falge et al. 2002)과 한시적이며 짧은 측정주기 및 빈도로 얻어진 토양호흡의 측정 값들을 비교하고, 종합적으로 삼림의 탄소순환 및 탄소수지를 평가함에 있어서 동시간대 및 면밀한 시·계열 변화에 따른 정량적 비교검토 및 상호검증을 하기가 어렵다 (Liang et al. 2004, Joo et al. 2011).

본 연구의 목적은 대기와 삼림 생태계 사이의 탄소순환의 동태 및 토양호흡의 특성을 명확히 이해하고자 야외 현장에서 장기간 연속적으로 자동 측정이 가능한 다중채널 자동채버시스템 (multi-channel automated chamber systems, MCACs)을 개발하고 지속적으로 그 성능과 구조의 개선 및 향상을 도모하는 것이다. 이를 위해서 국가장기생태연구의 일환으로 우리나라 냉·온대림의 대표적 낙엽활엽수종인 신갈나무림 (*Quercus mongolica* forest)에 구축된 남산생태실험지소의 삼림 토양표면에 새로 개발된 MCACs을 설치하고, 장기간에 걸쳐 연속적으로 측정된 토양호흡의 시·계열자료를 정량적으로 획득하며, 야외 적용에 따른 MCACs의 유용성 및 안정성을 시험하고자 한다. 또한 높은 시간분해능을 갖는 MCACs의 현장 연속 측정 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도와 기온, 토양온도, 토양수분 등의 관측자료를 이용하여 남산 신갈나무림 토양호흡의 시·계열변동 특성 및 경향을 밝힘과 동시에 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도에 영향을 미치는 주요 미기상 요인들과의 상호관계를 파악하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 조사지 개황

한반도 냉·온대림의 대표적인 낙엽활엽수인 신갈나무 (*Quercus mongolica*)가 우점 분포하는 서울시 남산의 15 - 20° 경사도를 가진 북동사면 (37° 33.1' N, 126° 59.3', 262 m a.s.l.)에 대기와 삼림 생태계 사이의 CO<sub>2</sub> 플럭스 (flux) 및 미기상과 탄소순환 동태를 모니터링 관측하기 위한 높이 33 m의 생태타워 (Nam-san ecological tower)를 중심으로 토양호흡 측정관련 장비 및 각종 시스템을 임상에 설치하였다 (Fig. 1).

본 연구 대상지역에는 수령이 약 49 - 55년인 신갈나무 (*Quercus mongolica*) 군락이 우점하고 있으며 주요 하층의 식생은 팔배나무 (*Sorbus alnifolia*), 때죽나무 (*Styrax japonica*), 당단풍나무 (*Acer pseudo-sieboldianum*) 등이다. 이곳 남산지역의 더 상세한 식생분포는 Lee et al. (2006)에 의해 보고되어 있다. 이 지역의 지난 10년간 연평균 강수량은 1,369.8 mm, 연평균 기온은 11.8°C이며, 최난월인 8월의 평균기온은 25.4°C, 그리고 최한월인 1월의 평균기온은 -3.4°C이다 (기상청

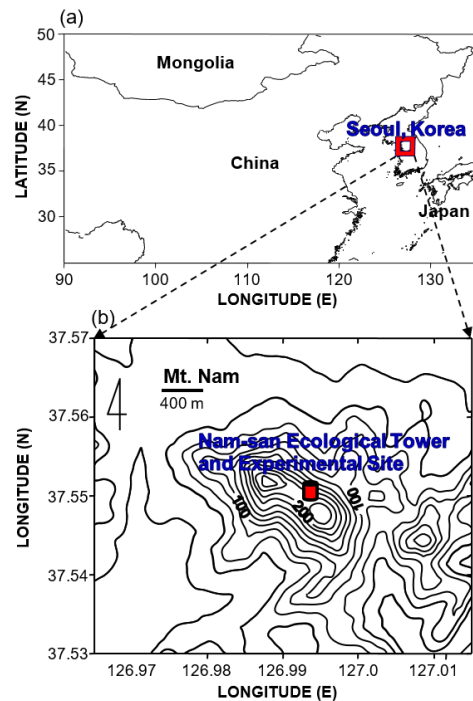


Fig. 1. Location of (a) Seoul, Korea and (b) the topography of Mt. Nam in Seoul with the indication of the ecological tower and experimental site (■).

서울기상대). 강수량은 주로 6월부터 8월에 집중되어 있으며 이 기간에 연강수량의 75%를 차지한다. 이 지역의 토양은 갈색삼림토양 (Dystric Cambisols)이고 모암은 주로 화강편마암 (granite-gneiss)으로 되어있다.

## 2.2 다중채널 자동챔버시스템 (Multi-Channel Automated Chamber systems) 설치

남산 생태타워 (Nam-san ecological tower)를 중심으로 신갈나무림의 임상에 2009년 6월에 40 m × 40 m 면적의 생태실험지소를 구축하였다. 생태실험지소를 사각형의 격자 형태인 16개의 보조실험구 (5 m × 5 m)로 나누고, 2009년 7월에 총 16개의 보조실험구 가운데, 무작위로 8개의 지점을 선정하여 시·계열의 변화에 따라 삼림 토양표면으로부터 대기 중에 발생되어지는 CO<sub>2</sub>의 유출속도 (soil CO<sub>2</sub> efflux rate)를 장기적이며 연속 자동측정하기 위하여 다중채널 자동챔버시스템 (multi-channel automated chamber systems, MCACs)을 제작하고, 8기의 자동개폐식형 토양챔버들을 지표면에 각각 설치 및 고정하였다 (Fig. 2). 단, 각각의 챔버와 챔버 사이의 간격은 최소 약 5 m 이상의 거리가 되게 하였다. 생태타워의 하단부에는 대기 및 토양의 CO<sub>2</sub> 농도 분석기 및 샘플공기순환펌프, 자료수집장치, MCACs용 가스밸브 및 유량계, 시스템 관련 주요 조절장치 (main controlling units), 모니터 및 자료 저장용 PC, 그리고 전원공급장치 (AC 220V) 등의 장기간 지속적인 관측을 위한 관련기기 및 장비를 안전하게 유지보관이 가능한 중앙제어상자를 설치하였다. 생태타워 및 중앙제어상자에서부터 샘플링이 이루어지는 각 토양챔버들과

는 25 m 이내의 거리를 유지시켰다. 또한 토양호흡 속도의 자동화 측정에 사용되는 모든 전기전원공급선, 측정신호전달선, 공기샘플 호스 등의 길이를 모두 25 m로 일정하게 하였다.

## 2.3 다중채널 자동챔버시스템 (MCACs)에 의한 토양호흡 연속 측정

남산 신갈나무림 임상의 지표면으로부터 토양 CO<sub>2</sub>의 유출속도 (토양호흡량)를 MCACs를 적용하여 2010년 1월부터 12월까지 12개월 동안 매 30분 간격으로 연속적으로 자동 측정하고 그 자료 분석을 실시하였다.

MCACs의 주요 구성부는 적외선 CO<sub>2</sub> 농도분석기 (Infrared gas analyzer, IRGA; LI-820, LI-COR Lincoln, NE, USA), 자료수집장치 (Datalogger; CR-1000; Campbell Scientific Inc., Utah, USA), 다중채널 방식의 가스샘플러 및 컨트롤러, 그리고 자동개폐식형 토양 챔버의 4개 부분으로 설계 및 제작되었다 (Fig. 3). MCACs에 의한 토양 CO<sub>2</sub>의 유출속도의 연속 측정 및 자료 분석의 이론적 접근방법은 밀폐순환법 (closed dynamic method)을 적용시켰다. 로직용 자료수집장치의 다중채널용 동기프로그램은 각 8개의 토양챔버 개폐장치가 DC-12V용 8-컨트롤러 (Weather Tech., Seoul, Korea)의 시간 릴레이 전자회로를 챔버당 3분 45초씩, 순차적으로 밀폐시켜 한 사이클 당 30분이 되어 연속적으로 토양 CO<sub>2</sub>의 유출속도를 측정하도록 구성되었다. 측정 순번이 된 챔버는 덮개가 밀폐되고, 챔버 내부의 공기는 샘플공기순환펌프의 유량 조절에 맞



Fig. 2. Photography of the multi-channel automated soil chamber installed at the Nam-san experimental site in a *Quercus mongolica* forest.



Fig. 3. Photography of the central module of multi-channel automated chamber systems (MCACs) developed for continuous measurements of soil respiration rate in the field.

취 채취되었다.

토양챔버는 직경 30 cm와 높이 20 cm의 투명한 폴리 카보네이트 (polycarbonate) 재질의 실린더를 사용하여 챔버 내부의 온도, 습도, 광도, 공기순환 등이 챔버 외부의 환경 상태와 차이가 발생하지 않도록 하였다 (Fig. 2). 8-컨트롤러로부터 토양호흡 측정 개시신호가 전달 되면 챔버의 덮개가 1분 45초 동안 천천히 닫힘과 동시에 챔버 내부의 공기혼합팬 (KMFH-12; Nihon Blower, Japan)과 샘플공기순환펌프 (CM-50; EMP, Tokyo, Japan)가 작동하여 챔버 내부의 공기와 외부의 공기중 CO<sub>2</sub> 농도가 동일하게 되도록 하였다. 토양챔버가 완전히 밀폐되면 챔버 내부의 공기는 5 L min<sup>-1</sup>의 샘플공기 순환펌프에 연결된 25 m의 흡입튜브를 따라서 가스샘플러의 흡입구로 들어간다. 흡입된 공기는 1차 가스유량계 (SEF-21A; STEC, Tokyo, Japan)와 1 μm mesh의 공기필터 및 건조제 용기를 통과하게 하였다. 이렇게 유입된 샘플공기 중의 일부분은 2차 가스유량계 조절에 맞춰 0.7 L min<sup>-1</sup> 유량으로 IRGA CO<sub>2</sub> 농도분석기를 통과하게 하였다. 이때 CO<sub>2</sub> 농도를 1초 간격으로 10초 동안 측정 평균 CO<sub>2</sub> 농도 값을 자료수집장치 및 PC에 저장하였다. CO<sub>2</sub> 농도 측정을 마친 샘플공기와 나머지 공기가 다시 합쳐져 처음 샘플링한 5 L min<sup>-1</sup>의 유량으로 샘플공기순환펌프에 의해 배출튜브를 따라 다시 토양챔버로 들어가는 25 m 길이의 순환을 30분마다 반복하게 하였다. 측정 종료시에 밀폐된 토양챔버의 덮개가 천천히 열리면서 챔버 내부의 공기혼합팬은 멈춰지고 다음 측정이 이루어질 때까지 챔버의 덮개가 열린 상태로 지속되어 외부 환경으로부터 낙엽, 강우, 태양복사, 바람 등이 자연적으로 유입되게 하여 토양챔버 내부의 환경이 임상 주변의 환경과 동일한 조건이 되게 하였다.

장기간 야외 현장에 설치 시에 강풍 및 폭우 등의 외부 환경의 교란으로부터 안정성과 내구성이 유지되도록 하기 위해서 토양챔버의 바깥쪽 면에 2개의 고정용 벨트 및 핀을 부착하였다. 또한 야외측정 기간 동안에 토양챔버 내부에 자라는 초본류 및 이끼류를 제거하여 토양호흡에 영향을 미치지 않도록 하였다. 연속 측정 자료는 자료수집장치 (Datalogger; CR-1000; Campbell Scientific Inc., Utah, USA) 및 저장용 PC에 자동 저장되어지고, 자료 분석을 위하여 한 달 간격으로 회수하였다.

## 2.4 주요 미기상 요인 측정

남산생태실험지소 내의 2지점에 1.5 m 높이에 직사 광선을 차단한 통풍 쉴드 내에 열전대 (thermocouple or PT) 센서를 설치하여 기온을 측정하였다. 또한 토양 온도는 임상의 지표면으로부터 5 cm와 10 cm 깊이에 각각 탐침 열전대 센서를 설치하여 측정하였다. 토양수분 함량은 탐침 TDR 수분센서 (CS-616; Campbell Scientific Inc., Utah, USA)를 사용하여 토양의 15 cm 깊이에 설치하여 측정하였다. 광량자속밀도 (photosynthetically active photon flux density, PPF)는 주변 식생의 영향을 받지 않는 수관층 위의 지점 및 수관층 안쪽의 임상에서 관측하기 위해서 생태타워 (ecological tower)의 관측용 센서기 거치대를 활용하여 지면으로부터 23 m와 50 cm 높이의 위치에 수평면 광량자속센서 (LI-190SA, LI-COR Lincoln, NE, USA)를 설치하여 측정하였다. 모든 토양호흡과 관련된 미기상 요인들의 관측자료들은 2010년 1월부터 12월까지 12개월 동안 1초마다 자동 측정된 자료를 10초 간격으로 평균하여 자료수집장치 (Datalogger; CR-1000; Campbell Scientific Inc., Utah, USA) 및 저장용 PC에 자동 저장하였다. 기록 저장된 관측자료는 매달 한 번씩 주기적으로 회수하였다.

## 2.5 야외측정 자료 및 통계 분석

단위면적과 단위시간당 토양표면으로부터 대기 중으로 발생하는 CO<sub>2</sub>의 유출속도 (soil CO<sub>2</sub> efflux rate; unit: mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)는 다음과 같이 산출하였다.

$$\text{Soil CO}_2 \text{ efflux rate} = (\Delta C / \Delta t) \cdot (V/A) \quad (\text{Eq. 1})$$

$\Delta C$ 는 측정시간 동안의 토양챔버 내부의 CO<sub>2</sub> 농도의 변화,  $\Delta t$ 는 측정시간,  $V$ 는 토양챔버 내부의 부피, 그리고  $A$ 는 토양챔버 밑 토양의 표면적이다.

야외 실험기간 동안에 얻어진 연속 측정자료로부터 산출된 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도에 영향을 미치는 각각의 미기상 요인들의 효과는 회귀분석을 이용하여 그 상관관계를 검정하였다. 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도와 기온 및 토양온도와 관계는 다음의 지수함수식 모델을 이용하였다.

$$\text{Soil CO}_2 \text{ efflux rate} = a \cdot e^{b \cdot T} \quad (\text{Eq. 2})$$

T는 온도(기온 또는 토양온도), a는 온도가 0°C일 때의 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도를 나타낸다. b는 온도가 10°C 상승할 때, 온도 민감도에 따른 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도의 증가와 관계된 계수이다. 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도에 대한 온도의존성 및 민감성을 나타내는 Q<sub>10</sub> 수치를 구하기 위한 계산식은 다음과 같다.

$$Q_{10} = e^{10 \cdot b} \quad (\text{Eq. 3})$$

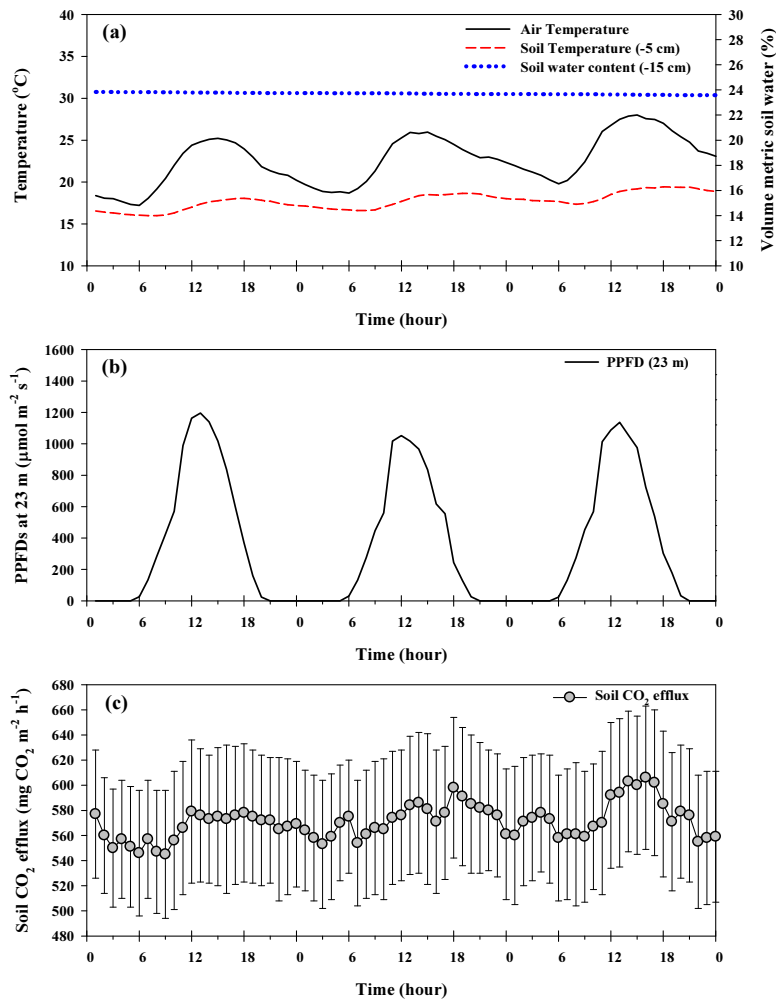
전체 야외 실험기간 동안에 연속적으로 측정된 모든 자료의 통계 분석과 검정은 StatView<sup>®</sup> 5.0 (SAS Insti-

tute Inc., USA)을 사용하였으며 결과 그래프의 표출은 SigmaPlot<sup>®</sup> 12 (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA)을 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 신갈나무림에서 연속 측정된 토양호흡 및 미기상의 일변화

남산 신갈나무림의 생태계의 성장시기인 6월중 맑은 날 3일 (2010년 6월 7 - 9일)을 선정하여, 시간 평균



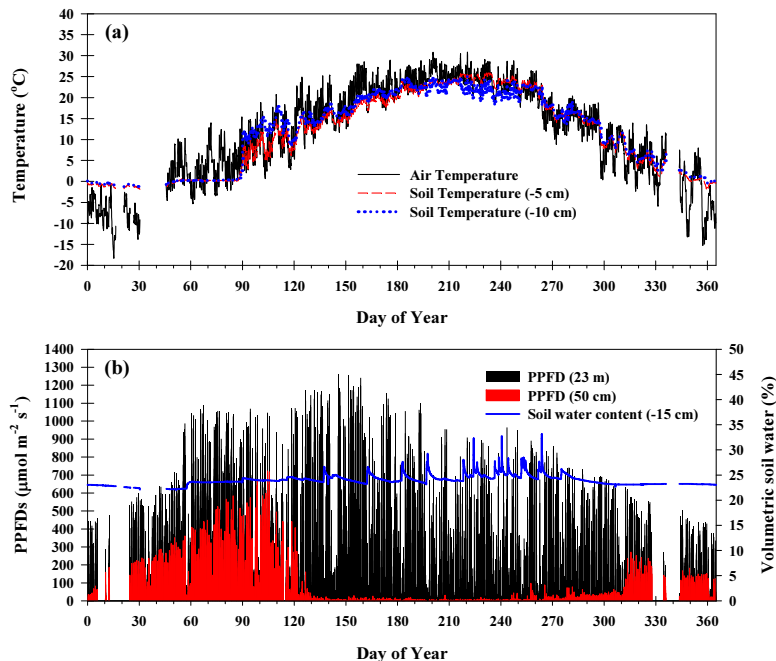
**Fig. 4.** Diurnal variations in (a) air temperatures at the 1.5 m height (°C, solid line), soil temperatures at the 5 cm depth (°C, red dashed line) and volumetric soil water contents at the 15 cm depth (% , blue dotted line), (b) PPFDs (photosynthetically photon flux densities) at the 23 m height (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, solid line), and (c) soil CO<sub>2</sub> effluxes (mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, gray circle and solid line) measured with the multi-channel automated chamber systems (MCACs) at the Nam-san experimental site in a *Quercus mongolica* forest during the sunny days from 7 to 9 June in 2010. Vertical bars indicate the standard error of eight soil chambers (n = 8).

값으로 토양호흡과 미기상 인자인 기온, 토양온도, 토양양수분 함량, 광합성속도 (photosynthetically active photon flux density, PPFD)의 일변화를 Fig. 4에 나타내었다. 이 기간 동안에 지면으로부터 1.5 m 높이에서 관측된 기온과 토양 5 cm 깊이에서 관측된 토양온도는 각각 17.2 - 27.6°C와 16.0 - 19.4°C 사이의 범위에서 변화하였다 (Fig. 4 (a)). 신갈나무림 군락의 수관층 위의 23 m 높이에서 측정된 PPFDs는 일출과 일몰에 따라 0 - 1,195  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 범위에서 변화하였고 태양의 고도가 높은 정오 12시경에 가장 큰 값을 보였다 (Fig. 4 (b)). 그러나 토양수분 함량은 3일 동안 일정하게 유지되었다. 남산 신갈나무림 임상에 설치한 MCACs로 연속 측정된 삼림 토양표면으로부터 대기 중으로 발생하는  $\text{CO}_2$ 의 유출속도, 즉 토양호흡 속도는 544.6 - 606.0  $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 범위 내에서 일변화를 나타내며 3일 평균 571.1  $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 값을 보였다 (Fig. 4 (c)). 신갈나무림 임상 내의 토양호흡 속도는 일중 온도 (기온 및 토양온도)가 상승함에 따라 증가하였고 온도가 하강함에 따라 감소하였다. 이처럼 삼림 생태계 성장시기의 맑은 날에 토양호흡의 일변화는 토양수분보다 온

도 변화에 더 밀접한 관계를 나타내며 전체적으로는 대칭적인 일변화 경향을 보였다 (Liang et al. 2004, Joo et al. 2011). 한편, PPFD의 일변화는 토양호흡에 직접적으로 관련되어 있기보다는 2 - 3시간 지체되어 삼림 임상 내의 기온 변화에 영향을 끼쳤다.

### 3.2 신갈나무림에서 연속 측정된 토양호흡 및 미기상의 계절적 변화

남산 신갈나무림 군락에서 2010년 1월부터 12월까지 연속적으로 측정된 시간평균의 기온과 토양온도 모두 현저하게 계절적 변화를 보여주었다 (Fig. 5 (a)). 삼림의 지면으로부터 1.5 m 높이에서 측정된 기온은 -18.3 - 30.8°C 사이의 범위에 분포하여 연평균 12.1°C를 나타냈다. 또한 토양 5 cm와 10 cm 깊이에서 관측된 토양온도는 각각 -1.9 - 25.9°C와 -1.4 - 25.3°C 사이의 범위 내에서 계절변화를 나타내고 연평균은 각각 11.0°C와 11.4°C로 기온보다 약간 낮은 수준을 보였다. 토양수분 함량은 22.0%에서 33.1%까지의 분포 범위에 머물렀고 연평균 24.0%를 나타냈다. 토양수분은

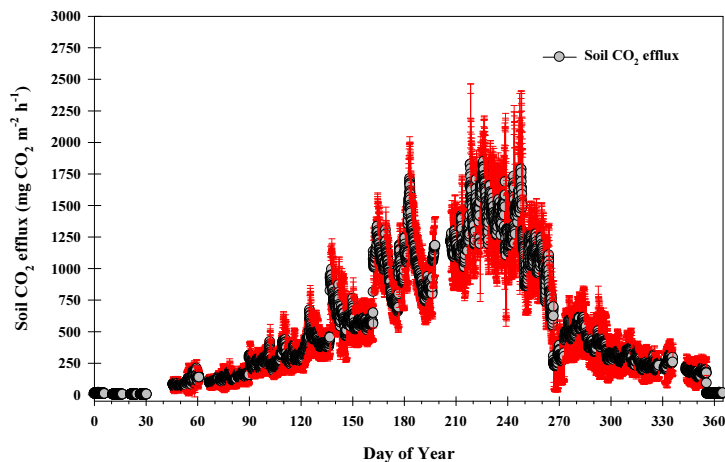


**Fig. 5.** Seasonal trends in hourly mean (a) air temperatures at the 1.5 m height ( $^{\circ}\text{C}$ , solid line), soil temperatures at the 5 cm depth ( $^{\circ}\text{C}$ , red dashed line) and soil temperatures at the 10 cm depth ( $^{\circ}\text{C}$ , blue dotted line), and (b) volumetric soil water contents at the at the 15 cm depth (%), PPFDs (photosynthetically photon flux densities) at the 23 m height ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , black bars) and PPFDs at the 50 cm height ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , red bars) at the Nam-san experimental site in a *Quercus mongolica* forest from January to December 2010.

뚜렷한 계절변화를 나타내지 않았지만 강우 발생 후, 토양수분 함량은 단기간 동안 빠르게 증가되었다 (Fig. 5 (b)). 또한 신갈나무림 군락의 수관층 위의 23 m 높이와 지면으로부터 50 cm 높이에서 관측한 PPFDs는 각각  $0 - 1,261 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 와  $0 - 722 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  사이의 범위에 분포하였다 (Fig. 5 (b)). 남산 신갈나무림 군락의 생태실험지소에서 PPFDs는 봄철의 잎 전개 및 발달에 따라 수관층 내부의 광환경은 매우 어둡고 낮은 광량으로 변하며, 가을철 낙엽시기부터 다시 임내의 광량이 증가하는 계절적인 변화 양상을 나타내었다. 신갈나무림 수관에 의해 흡수되는 PPFDs는 연간 총 광량의 약 84%이었고, 잎이 없는 시기 (12월 - 3월) 중에 가지 및 줄기에 의해 차단되는 PPFDs는 이 시기 총 광량의 약 64%이었다.

남산 신갈나무림 임상에서 8기의 자동개폐형 토양 챔버들로 구성된 MCACs를 사용하여 2010년 1월에서 12월까지의 야외실험기간 동안 30분 간격으로 토양  $\text{CO}_2$  유출속도를 연속적으로 측정할 결과는 Fig. 6과 같다. 시간평균 토양  $\text{CO}_2$  유출속도는  $0.3 - 1,848.3 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며, 기온 및 지온이 상승하기 시작하는 봄철 4월부터 현저하게 증가하여 여름철인 7월과 8월 사이의 기간 중에 가장 높은 값을 보였다. 이후, 가을철 10월부터 기온이 하강함에 따라 점차적으로 토양  $\text{CO}_2$  유출속도는 감소하기 시작하였다. 이처럼 토양호흡의 계절적인 변동은 기온과 토양온도의 변화와 매우 유사한 경향을 나타냈으며 (Figs. 5 and 6),

이 측정기간 중 남산 신갈나무림 군락지역에서 토양으로부터 대기 중에 배출한 연평균 토양호흡량은 약  $11.1 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었다. Yi (2003)에 따르면 강원도 춘천지역의 신갈나무림 (*Quercus mongolica* forest)에서 휴대용 적외선 가스분석기 (EGM-3, PP System, Inc., UK)를 사용하여 매일 1회씩 10개 지점에서 측정한 결과, 토양호흡량은  $0.96 - 48 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 연평균 약  $13.7 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 를 보고하였다. 또한 Yi et al. (2005)은 상기와 같은 기종의 휴대용 적외선 가스분석기와 측정주기로 서울시 남산 및 강원도 춘천지역들의 신갈나무림의 토양호흡량은  $6.5 - 9.8 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 연평균 약  $7.7 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 값을 제시하였다. Kang et al. (2003)에 의하면 강원도 점봉산 및 서울시 남산의 신갈나무림과 경기도 광릉의 졸참나무림 (*Quercus serrata* forest)에서 추정된 연간 토양호흡량의 분포 범위는 약  $10.8 - 12.5 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었다. 이와 같이 국내 신갈나무림의 토양호흡에 관련된 선행연구들과 종합적으로 비교하여 보면 본 연구에서 나타난 결과들은 이들 범위 내에 있고 전체적인 토양호흡의 계절적 변동과 신갈나무림 임상에서 측정되어지는 기온 및 토양온도의 계절변화는 매우 유사한 경향을 나타내었다 (Figs. 5 and 6). 한편, Lee et al. (2012)은 충남 공주지역의 상수리나무림 (*Quercus acutissima* forest)에서 토양호흡량은 약  $2.3 - 32.3 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 연평균 약  $12.0 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 를 보고하였다. 또한 강원 춘천



**Fig. 6.** Seasonal trends in hourly mean soil  $\text{CO}_2$  effluxes ( $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , gray circle and solid line) measured with the multi-channel automated chamber systems (MCACs) at the Nam-san experimental site in a *Quercus mongolica* forest from January to December 2010. Vertical bars indicate the standard error of eight soil chambers ( $n = 8$ ).



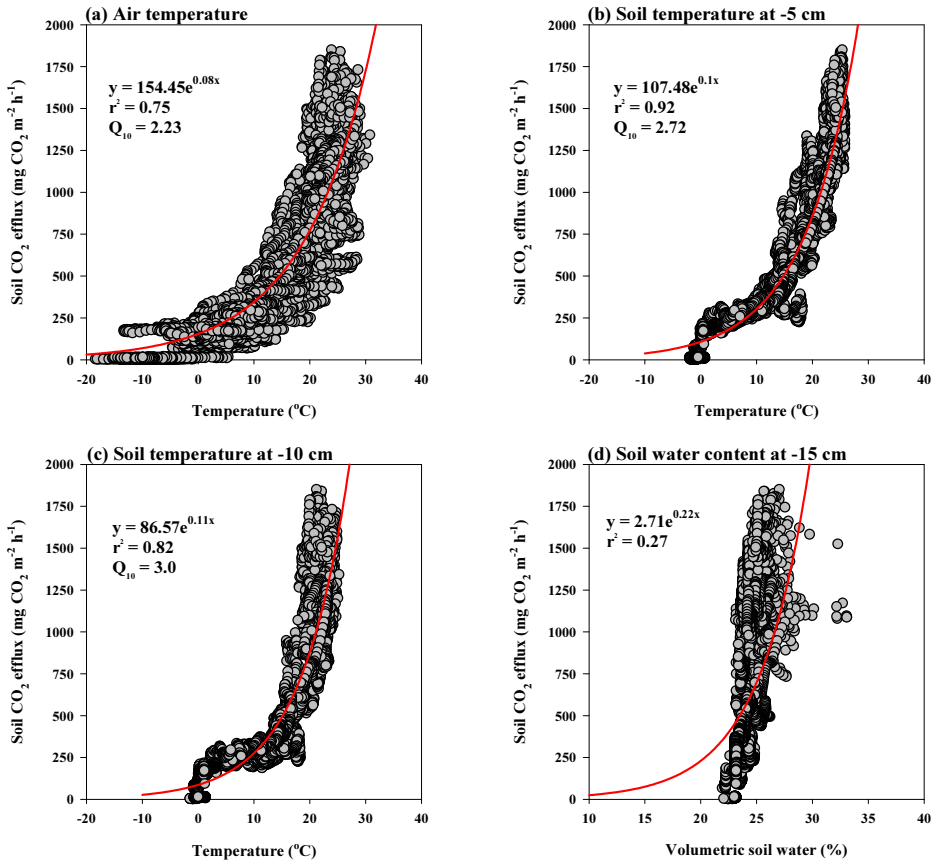
지역 2곳의 굴참나무림 (*Quercus variabilis* forest)에서 각각 연평균 약 12.5와 12.2 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이었으며 (Yi 2003), 경남 진주지역의 굴참나무림 (*Quercus variabilis* forest)과 굴피나무림 (*Platycarya strobilacea* forest)에서 각각 약 13.5과 15.2 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> (Moon 2004)을 나타냈고, 경기 광릉지역의 졸참나무림 (*Quercus serrata* forest)에서 약 6.3 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> (Suh et al. 2005)를 보고하였다. 본 연구의 결과를 포함한 신갈나무림 관련 토양호흡 외에 국내의 대표적인 참나무 수종으로 구성된 낙엽활엽수림에서 측정된 상기의 선행연구의 결과물들을 종합해 보면, Singh and Gupta (1977)가 온대지역의 다양한 삼림 생태계에서 분석한 약 0.24 - 24.0 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 토양호흡량 분포 범위내에 있었고, 한편 Luo and Zhou (2006)가 온대지역의 여러 낙엽활엽수림에서 고찰한 약 4.02 - 10.1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 토양호흡량 범위보다는 조금 넓었다. 본 연구에서 MCACs의 적용에 의한 높은 시간분해능으로 장기간에 걸쳐 짧은 측정 주기로 연속 측정된 결과는 휴대용 적외선 가스분석기를 이용하여 상대적으로 단기간에 걸쳐 긴 측정주기를 갖는 선행연구의 결과물들과 측정시기 및 시간대가 달라서 상세한 시·계열에 변화 따른 비교분석 및 상호검증을 직접적으로 하기는 어렵지만, 본 연구의 MCACs의 측정 결과에 따른 연평균 토양호흡량은 기존 연구의 추정 값들과 모순되지 않은 것으로 보아 수집된 데이터의 정확성이 크고 시·계열상 해상도 역시 크다고 볼 수 있다.

### 3.3 토양호흡 속도와 주요 미기상 요인들과의 상관관계 분석

삼림 생태계의 토양호흡에 관련된 대다수의 연구들의 결과에 따르면 토양호흡의 계절적 변화 및 단기적 일 변화는 주로 기온 및 토양온도들의 변동에 의하는 것으로 알려져 있으며 그들 사이에는 높은 상관관계를 나타내고 있다 (Suh et al. 2005, Joo et al. 2011, Lee et al. 2012). 그러나 토양수분 함량의 경우, 토양호흡과는 비교적 낮은 상관관계를 나타내며 (Ohashi et al. 1999, Liang et al. 2004), 낮은 토양수분 함량의 조건은 온대 삼림지역의 토양호흡량을 감소시킨다고 보고되었다 (Kosugi et al. 2005, Borken et al. 2006). 2010년 1월에서 12월의 남산 신갈나무 군락 임상에서 토양표면으로부터 대기로 CO<sub>2</sub> 유출인 토양호흡과 주요 미기상 요인

인 온도(기온 및 토양온도) 및 토양수분 함량과의 상관관계를 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 토양호흡은 토양 10 cm 깊이의 토양온도 변화( $r^2 = 0.82$ ) 및 지표로부터 1.5 m 높이의 기온 변화( $r^2 = 0.75$ ) 보다 토양 5 cm 깊이의 토양온도 변화( $r^2 = 0.92$ )와 더 높은 상관관계를 나타내었다. 그러나 토양수분 함량 변화 ( $r^2 = 0.27$ )와는 온도 요인과의 관계보다 낮은 상관관계를 보였다.

야외 현장실험에서 얻어진 높은 시간분해능의 연속 측정자료는 토양 CO<sub>2</sub> 유출속도가 온도(기온과 토양온도) 증가에 따라 지수함수적으로 증가함을 보여주었다 (Figs. 7 (a), 7 (b), 7 (c)). 한편 온도변화에 토양호흡 관계를 바탕으로 토양호흡의 온도 민감성 지표인 Q<sub>10</sub>은 기온에 대하여 2.23, 5 cm 깊이와 10 cm 깊이의 토양온도에 대해서는 각각 2.72, 3.0을 나타냈다. 이 결과들은 Raich and Schlesinger (1992)가 다양한 온대지역의 낙엽활엽수림에서 고찰한 연간 1.3 - 3.3 범위의 Q<sub>10</sub> 수치 내에 속하며 평균 Q<sub>10</sub> 수치로 제시한 약 2.4에 근접하였다. 또한 Moon (2004)이 보고한 경남 진주지역의 소나무림, 굴참나무림, 그리고 굴피나무림에서의 연간 Q<sub>10</sub> 수치들은 각각 약 2.38, 2.11, 2.07으로 본 연구의 Q<sub>10</sub> 수치보다는 조금 낮은 경향이 있었다. 그러나 강원도 춘천지역의 신갈나무림에서 연간 Q<sub>10</sub>은 5.3 (Yi 2003)을 나타내고 경기도 광릉 지역의 졸참나무림에서 연간 Q<sub>10</sub>은 4.2 (Suh et al. 2005)로 보고되어 본 연구의 결과들과 비교해보면 상당히 높은 Q<sub>10</sub> 수치를 나타내었다. 한편, Davidson et al. (1998)은 온대 혼합림에서 Q<sub>10</sub> 수치는 3.4 - 5.6의 범위를 나타내고 연간 토양호흡과 온도와의 지수함수 관계로부터 구한 Q<sub>10</sub>은 온도에 대한 반응뿐만 아니라 토양수분 함량, 식물뿌리량, 낙엽낙지의 공급량, 토양미생물과 토양동물의 계절적 변화들이 복합적으로 상호작용하여 Q<sub>10</sub>의 수치에 영향을 주는 것으로 보고하였다. 따라서 삼림토양으로부터 발생하는 CO<sub>2</sub>량은 온도 의존적인 것이 분명하지만 식물군락 입지 특성과 온도 이외의 기후요인에 의하여 크게 변형될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 생각은 Fig. 7 (b)와 Fig. 7 (c)에서 토양온도가 0°C에 도달하면 CO<sub>2</sub> 발생은 0 (zero)에 수렴하고, 해빙과 동시에 급격히 늘어나는 것으로 보아 기온 증가 특히 토양온도 증가의 기후적 영향은 동토대 (tundra)의 해빙이 CO<sub>2</sub> 발생에 큰 영향을 줄 수 있음을 암시한다.



**Fig. 7.** Relationships between soil CO<sub>2</sub> effluxes (mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) measured by the multi-channel automated chamber systems (MCACs) and temperatures (°C) measured at (a) the 1.5 m height, (b) at the 5 cm depth and (c) the 10 cm depth, and (d) volumetric soil water contents (%) at the at the 15 cm depth at the Nam-san experimental site in a *Quercus mongolica* forest from January to December 2010. The best-fitted exponential curve (red solid line) and Q<sub>10</sub> values are shown.

#### 4. 결론 및 제언

토양호흡은 전 지구 탄소순환 경로에서 두번째로 큰 CO<sub>2</sub> 플럭스이며 대기중에 CO<sub>2</sub>를 공급하는 주요 경로 시스템이다. 그러므로 육지면적의 약 30 - 40%를 차지하고 있는 삼림 생태계의 탄소수지 및 탄소순환 메커니즘의 중요한 구성요소인 토양호흡을 정량적으로 측정하고 지속적으로 평가함은 필수불가결하다. 본 연구에서는 사계절 내내 높은 시간분해능으로 야외 현장에서 연속 자동측정이 가능한 다중채널 자동챔버시스템 (MCACs)을 적용하여 남산 신갈나무림의 생태실험지소에서 토양호흡을 정량적으로 연속 측정하고 자료 분석하여 MCACs의 그 안정성과 신뢰성을 시험테스트하고 시·계열변화에 따른 토양호흡의 특성 및 경향을 파악하였다. 또한 동시에 연속 측정된 미기상 관측자료

를 이용하여 토양호흡 속도에 영향을 미치는 주요 미기상 요인과의 상호관계를 분석하였다. 2010년 1월부터 12월의 사이의 측정실험기간 동안 토양호흡 속도는 0.3 - 1,848.3 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>의 범위를 나타내고 연평균 약 11.1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이었다. 토양호흡의 일변화 및 계절변화는 뚜렷하게 온도 (기온과 토양온도) 요인들의 변화와 매우 유사한 경향을 나타내며 특히, 5 cm 깊이의 토양온도와 높은 상관관계를 보였다. 이 지역 토양호흡의 온도 민감성을 나타내는 Q<sub>10</sub>은 2.23 - 3.0이었다. 본 연구의 결과들은 MCACs가 야외 현장에서 국가 장기생태연구의 목적에 알맞게 장기간에 걸쳐 연속적으로 자동측정이 가능하며 토양호흡의 세밀한 시·계열변화를 정량적으로 밝히고 동시에 미기상 및 환경 요인들의 영향 및 효과도 같은 시·계열에 따라 파악될 수 있어 매우 유용한 자동화 토양호흡 측정시스템임을 나

타내었다.

국토의 약 65% 이상이 삼림으로 구성되어 있는 우리나라의 경우, 최근에 빈번한 토지 이용 및 개발에 따른 삼림 생태계의 교란 및 파괴가 예상되어지고 있다. 더욱이 급속한 지구 온난화 및 기후위기에 따른 탄소수지 및 탄소순환 동태를 보다 정확히 파악하고 예측을 하기 위해서는 다양한 삼림 생태계지역의 여러 지점에 자동화 토양호흡 측정시스템의 구축이 필요한 실정이다. 또한 기존의 토양호흡 측정장비들과 함께 야외 현장실험에 적용하여 상호비교 및 정량화 검증을 통한 측정방법간의 오차를 줄이고 보다 안정적이고 효율적인 방법의 개발을 위한 노력이 요구되어진다.

## 감사의 글

This work was supported by a grant from the National Institute of Ecology (NIE), funded by the Ministry of Environment (MOE) of the Republic of Korea (NIE-B-2020-02).

## References

- Bond-Lamberty, B., Wang, C., and Gower, S. 2004. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration. *Global Change Biology* 10(10): 1756-1766.
- Borken, W., Savage, K., Davidson, E.A., and Trumbore, S.E. 2006. Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil. *Global Change Biology* 12(2): 177-193.
- Buchmann, N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 1625-1635.
- Chae, N., Kim, J., Kim, D., Lee, D., Kim, R., Ban, J., and Son, Y. 2003. Measurement of soil CO<sub>2</sub> efflux using a closed dynamic chamber system. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 5(2): 94-100.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A., and Totterdell, I.J. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408: 184-187.
- Davidson, E.A., Belk, E., and Boone, R.D. 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology* 4: 217-227.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., and Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Falge, E., Balodocchi, D., Tenhunen, J., Aubinet, M., Bakwind, P., Berbigier, P., Bernhofer, C., Burba, G., Clement, R., Davis, K.J., Elbers, J.A., Goldstein, A.H., Grelle, A., Granier, A., Guðmundsson, J., Hollinger, D., Kowalski, A.S., Katul, G., Law, B.E., Malhi, Y., Meyers, T., Monson, R.K., Munger, J.W., Oechel, W., Paw, U.K.T., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Valentini, R., Wilson, K., and Wofsy, S. 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 113: 53-74.
- Fang, C., Smith, P., Moncrieff, J.B., and Smith, J.U. 2005. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature* 433: 57-59.
- Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T., and Andrews, J.A. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48: 115-146.
- IPCC 2001. A report of working group of the intergovernmental panel on climate change, climate change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC 2007. Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, climate change 2007. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jassal, R.S. and Black, T.A. 2006. Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration using small-area trenched plot technique: Theory and practice. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 193-202.
- Joo, S.J., Park, M.S., Kim, G.S., and Lee, C.S. 2011. CO<sub>2</sub> flux in a cool-temperate deciduous forest (*Quercus mongolica*) of Mt. Nam in Seoul, Korea. *Journal of Ecology and Field Biology* 34(1): 95-106.
- Kang, S.K., Doh, S.Y., Lee, D.S., Lee, D.W., Jin, V.L and Kimball, J.S. 2003. Topographic and climate controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology* 9: 1427-1437.
- Kosugi, Y., Tanaka, H., Takahashi, S., Matsuo, N., Ohte, N., Shibata, S., and Tani, M. 2005. Three years of carbon and energy fluxes from Japanese evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 329-343.
- Landsberg, J.J. and Gower, S.T. 1997. Application of physiological ecology to forest management. Academic Press, New York, USA.
- Law, B.E., Kelliher, F.M., Baldocchi, D.D., Anthoni, P.M., Irvine, J., Moore, D., and Van Tuyl, S. 2001. Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forest during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 27-43.
- Lee, C.S., Cho, Y.C., Shin, H.C., Lee, C.H., Lee, S.M.,

- Seol, E.S., Oh, W.S., and Park, S.A. 2006. Ecological characteristics of Korean red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) forest on Mt. Nam as a long term ecological research (LTER) site. *Journal of Ecology and Field Biology* 29: 593-602. (in Korean)
- Lee, K.J., Won, H.Y., and Mun, H.T. 2012. Contribution of root respiration to soil respiration for *Quercus acutissima* forest. *Korean Journal of Environment and Ecology* 26(5): 780-786. (in Korean)
- Liang, N., Nakadai, T., Hirano, T., Qu, L., Koike, T., Fujinuma, Y., and Inoue, G. 2004. In situ comparison of four approaches to estimating soil CO<sub>2</sub> efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 123: 97-117.
- Lloyd, J. and Taylor, J.A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* 8: 315-323.
- Luo, Y. and Zhou, X. 2006. *Soil Respiration and the Environment*. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Moon, H.S. 2004. Soil respiration in *Pinus densiflora*, *Quercus variabilis* and *Platycarya strobilacea* stands in Jinju, Gyeongnam province. *Journal of Ecology and Field Biology* 27(2): 87-92. (in Korean)
- Nakane, K. 2001. Quantitative evaluation of atmospheric CO<sub>2</sub> sink into forest soils from the tropics to the boreal zone during the past three decades. *Ecological research* 16: 671-685.
- Ohashi, M., Gykusen, K., and Daito, A. 1999. Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method. *Forest Ecology and Management* 123: 105-114.
- Oikawa, T. 1990. Modeling primary production of plant communities. *Physiological Ecology of Japan* 27: 63-80.
- Raich, J.W. and Schlesinger, W.H. 1992. The global carbon dioxide efflux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44b: 81-99.
- Saigusa, N., Yamamoto, S., Murayama, S., Kondo, H., and Nishimura, N. 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.
- Singh, J.S. and Gupta, S.R. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review* 43: 449-528.
- Suh, S.U., Min, Y.K., and Lee, J.S. 2005. 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): 57-66. (in Korean)
- Wigley, T.M.S. and Schimel, D.S. 2000. *The carbon cycle*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 7-49.
- Yi, M.J. 2003. Soil CO<sub>2</sub> evolution in *Quercus variabilis* and *Q. mongolica* forests in Chunchon, Kangwon province. *Journal of Korean Forestry Society* 92(3): 236-269. (in Korean)
- Yi, M.J., Son, Y., Jin, H.O., Park, I.H., Kim, D.Y., Kim, Y.S., and Shin, D.M. 2005. Belowground carbon allocation of natural *Quercus mongolica* forests estimated from litterfall and soil respiration measurements. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 7(3): 227-234. (in Korean)