사과 과수원에서의 토양 CO₂ 발생량 평가

이재만¹ · 김승희^{2*} · 박희승¹ · 서형호³ · 윤석규²

¹중앙대학교 식물응용과학과, ²국립원예특작과학원 과수과,

³국립원예특작과학원 온난화농업대응연구센터

(2009년 4월 2일 접수; 2009년 6월 3일 수정; 2009년 6월 22일 수락)

Estimation of Soil CO₂ Efflux from an Apple Orchard

Jae-Man Lee¹, Seung-Heui Kim^{2*}, Hee-Seung Park¹, Hyeong-Ho Seo³ and Seok-Kyu Yun²

¹Department of Applied Plant Science, Chung Ang University, Anseong 456-756, Korea

²Fruit Research Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Suwon 441-706, Korea

³Agricultural Research Center for Climate Change, National Institute of

Horticultural & Herbal Science, RDA, Suwon 441-706, Korea

(Received April 2, 2009; Revised June 3, 2009; Accepted June 22, 2009)

ABSTRACT

This study was conducted to quantify the soil respiratory CO₂ emission (SR) in an apple orchard and to determine its relationship with key environmental factors such as air temperature, soil temperature and soil moisture content. Experiment was made over the period from 23 April 2007 to 31 March 2008 in 'Fuji' apple orchard of National Institute of Horticultural and Herbal Science in Suwon, Gyeonggi-do, Korea. The SR was measured by using the automatic opening/closing chamber system based on a closed method. Diurnal variations in SR showed an increase around 0700 hours with increasing soil temperature, its peak between 1400 and 1500 hours, and then a gradual decrease thereafter. Daily variations in SR depended largely on soil and air temperatures over the year, ranging from 0.8 to 13.7 g CO₂ m⁻² d⁻¹. During the rainy spell in summer (July~Autumn) with higher temperature and more precipitation, the SR was lower than that in the spring (May~June) with moderate temperature. The SR showed a significant exponential relationship with soil temperature ($r^2=0.800$) and air temperature ($r^2=0.805$), but not with soil moisture content ($r^2=0.160$). The Q₁₀ values of SR with annual soil temperature and air temperature were 2.0 and 1.9, respectively. The annually integrated SR was 19.6 ton CO₂ ha⁻¹.

Key words : Soil CO₂ emission, Soil temperature, Apple orchard, AOCC(Automatic Opening Closing Chamber)

I. 서 언

최근 지구 온난화에 따른 기상이변의 원인으로 알려진 온실가스 방출에 대한 우려와 감축 의무가 산업분야뿐만 아니라 농업분야에서도 확산되고 있다. 온실가스 중 CO₂는 지구 온난화 또는 총 온실효과의 약 60%를 차지하여 지구 온난화와 기후변화의 중요한 요

인으로 인식되고 있으며(Rastogi *et al.*, 2002), 대기 CO₂의 약 10%에 해당하는 막대한 양의 CO₂가 매년 토양으로부터 방출된다(Raich and Schlesinger, 1992). 이는 현재 화석연료의 소비에 의해 발생하는 CO₂의 약 10배가 넘는 양이다. 토양에서 발생하는 CO₂는 토양 호흡의 형태로 방출되며, 토양 호흡은 뿌리호흡(root respiration)과 미생물호흡(microbial respiration)

* Corresponding Author : Seung-Heui Kim (vitis@rda.go.kr)

으로 구성된다(Gough and Seiler, 2004). 뿌리호흡은 뿌리 자체의 호흡과 뿌리에 공생하는 미생물과 균류의 호흡이며, 미생물 호흡은 토양 내 미생물에 의한 식물의 낙엽, 낙지 등과 토양 유기물의 분해과정에서 발생되는 호흡이다(Jassal and Black, 2006).

토양으로부터의 CO₂ 방출은 생물요소 및 비생물요소들에 의해 조절되는 복잡한 과정이다(Buchmann, 2000). 즉, 생물적 요소인 토양 생물군에 의한 CO₂ 발생 조절(Raich and Schlesinger, 1992; Tufekcioglu *et al.*, 2001)과 토양 온도나 토양수분과 같은 비생물적 요소에 의한 CO₂ 발생 조절이 가장 중요한 요소로 알려져 있다(Raich and Schlesinger, 1992; Davidson *et al.*, 1998). 토양온도의 상승은 유기물 분해, 산화, 미생물과 뿌리의 활성 그리고 탄소분해과정을 촉진시켜 토양으로부터의 CO₂ 방출을 증가시키며(Boone *et al.*, 1998; Davidson *et al.*, 1998), 높은 토양수분은 미생물 활성에 더 좋은 조건을 제공하여 미생물의 산소소비와 CO₂ 발생을 증가시키기도 한다(Buyanowsky and Wagner, 1983). 그러나 토양호흡에 대한 이러한 생물적 및 비생물적 영향은 식생의 형태에 따라 크게 다를 수 있다. 따라서 다양한 식생을 대상으로 토양호흡에 대한 토양온도 및 습도와 같은 토양환경의 영향을 파악하는 것은 미래의 기후변화에 따른 온도 증가나 강수량 변화 등의 환경 변화에 대한 토양의 CO₂ 방출량을 예측하는데 있어서 매우 중요하다. 그러나 현재 우리나라에서의 토양 호흡에 대한 연구는 대부분 산림 생태계에 국한되어 있으며(Lee and Moon, 2001; Yi, 2003; Moon, 2004; Min, 2006) 논, 밭 경작지, 초지, 과수원 등에서의 토양 호흡 연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 우리나라의 과수생태계에서 큰 비중을 차지하는 사과원을 대상으로 토양호흡을 연속적으로 측정하여, 토양으로부터 방출되는 CO₂의 일변화 및 계절변화를 정량화함으로써 사과원 토양 호흡에 대한 토양온도와 수분의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 실험 site

경기도 수원 소재 국립원예특작과학원 내의 사과원 (N 37° 18', E 126° 49', 해발 56m) 토양을 대상으

로 2007년 4월23일부터 2008년 3월31일까지 연속적으로 CO₂방출량을 측정하였다. 실험지 과원의 품종은 '후' / M.27/10년생이었으며, 재식거리가 2×3m (1,666 tree ha⁻¹)이고 지하 0.8m에 암거배수가 설치되어 있어 강우 시 전체적으로 배수가 용이하였다.

2.2. 환경인자 측정

사과원 내의 기온은 수관 하부로부터 지상1.5m 지점, 지온은 각 토양호흡측정 챔버 내의 지표면으로부터 0.05m 깊이에서 각각 HMP-45C(Campbell Scientific Inc. USA)와 109-L(Campbell Scientific Inc. USA), 열전대(Copper-constantan)를 이용하여 측정하였다. 토양 수분 함량은 2007년 5월 20일부터 실험종료 시까지 TDR sensor(CS 616, Campbell Scientific Inc. USA)를 이용하여 0-0.15m 토양층에서 측정하였다. 실험기간 중의 강수량은 수원 기상청자료를 활용하였다.

2.3. 토양호흡 측정

토양호흡의 측정에는 자체 제작한 자동 개폐식챔버 (Automatic Opening/Closing Chamber, AOCC)를 이용하였으며(Fig. 1), 주간의 수관 하부에 챔버를 설치한 후 약 한 달 정도의 안정화 단계를 거친 다음 측정을 개시하였다. AOCC밀폐법(closed method)을 채택하여 여러 개의 동일한 챔버를 대상으로 순차적이고 연속적인 측정이 가능한 다채널(Multi-channel)방식 자료 수집 장치(CR1000, Campbell Scientific Inc. USA)의 프로그램에 의해 SDM AC/DC 16 controller (Campbell Scientific Inc. USA)를 이용하여 토양호흡

Fig. 1. Conceptual diagram of automatic opening/closing chamber system for soil respiration measurement.

Fig. 2. Temporal changes of CO₂ concentration and soil temperature (at 0.05m) inside automatic opening/closing chamber for a 160-second measurement period.

을 측정하였다. 측정개시와 동시에 챔버의 덮개가 밀폐되고 측정종료 시 덮개가 열린 상태로 유지되어 강우나 낙엽 등이 그대로 유입되도록 하여 챔버 내부의 환경이 주변환경과 가능한 한 유사한 상태를 유지하도록 하였다. 챔버 형태 및 재질은 내부의 원활한 공기 순환과 온도, 광도, 습도 등의 환경적 제약이 적은 투명한 원통 아크릴(Volume: 35,837cm³, Inside diameter ×Height: 0.39m×0.30m)을 사용하였으며 야외에서의 원통아크릴의 안정적 고정과 내구성을 위해 고정대를 외부에 설치하였다(Fig. 1). 토양 호흡 측정 시 챔버 내부의 공기는 공기순환펌프(Techno Takatsuki CO. LTD)를 작동시켜 2l min⁻¹로 순환시켰으며, 토양에서 발생된 CO₂ 분석은 유량계를 이용하여 0.8l min⁻¹로 CO₂적외선 분석기(Li-820, Campbell Scientific Inc. USA)를 통과시켜 측정하였다. 데이터는 1초마다 측정하여 10초 평균값으로 자료수집장치(CR-1000, Campbell sci.)에 저장하였다.

토양호흡을 측정하기 전에 공기 순환 펌프와 챔버 내부 순환 팬이 먼저 작동하여 챔버 내부의 공기를 대기와 최대한 동일하게 유지시켰으며 챔버가 닫혀 있는 시간은 160초로 설정하였다. 토양 호흡 측정기간 동안 챔버 내부에 자라는 초본류의 광합성 작용에 의해 토양 호흡이 과소평가 되지 않도록 챔버 내부에서 자라는 초본류는 뿌리까지 모두 제거하였으며, 챔버 배치 및 측정은 완전임의배치법으로 세 번 반복하여 실시하였다.

측정시간(160초)동안 챔버 내의 CO₂변화를 확인한 결과, 챔버가 닫히고 약 40~50초 경과 후 CO₂농도가

안정적으로 지속적인 증가 경향을 나타냈으며 가장 안정적인 구간인 챔버가 열리기 전 80초간의 데이터를 자료분석에 이용하였다(Fig. 2). Hongxing *et al.* (2007)은 밀폐법을 기초로 한 자동 챔버 측정방식에서 챔버당180초 동안 토양호흡을 측정하였으며, 또한 밀폐법을 기초로 하여 챔버 내에 식물체를 포함한 CO₂ 플럭스 측정 시 챔버가 닫힌 후 1~3분 동안 농도의 변화가 CO₂ 플럭스를 계산하는데 적당하다(Nishimura *et al.*, 2005)는 연구결과와 본 실험에서의 토양호흡 측정시간(160초)은 유사한 범위였다. 본 실험에서 밀폐된 챔버에 의해 토양 호흡에 영향을 미칠 수 있는 토양온도의 변화는 무시할 수 있는 수준이었으며, 각 챔버별 공간적 위치 차이로 인한 CO₂ 농도 변화에 약간의 차이가 발생하였다(Fig. 2).

2.4. 토양호흡속도(Soil respiration rate; SR)의 추정

토양호흡속도(mg CO₂ m⁻² s⁻¹)는 단위면적에서 단위시간당 방출되는 CO₂로 나타낼 수 있는데, 본 실험에서는 다음의 계산식(Nakayama, 1990)을 이용하여 추정하였다.

$$SR = \left(\frac{\Delta c}{\Delta t} \right) \frac{V}{A} = \left(\frac{\Delta c}{\Delta t} \right) h$$

여기에서 Δc 는 측정시간(초), Δc 는 측정 시간 동안의 CO₂농도 변화(μmol/mol), V 는 챔버 부피(m³), A 는 챔버에 의해 덮인 토양 표면적(m²), h 는 챔버의 높이(m)이다.

토양호흡속도와 온도 사이의 관계는 지수함수식 모

텔을 이용하였다(Lloyd and Taylor, 1994):

$$SR = a \exp^{(bT)}$$

여기에서 a 와 b 는 상수, T 는 온도(°C)이며, a 는 온도가 0°C일 때의 토양호흡속도(SR_0)를 나타내며, b 는 온도가 10°C 증가할 때 토양호흡의 온도 민감성(Q_{10})인 토양호흡속도의 증가에 관계된 계수로서 Q_{10} 의 계산 공식은 다음과 같다.

$$Q_{10} = \exp^{(b \times 10)}$$

한편, 토양호흡속도와 토양 수분 함량과의 관계는 이차함수적 관계를 이용하였다(Bunnell *et al.*, 1977; Linn and Doran, 1984).

2.5. 자료 분석

실험기간을 통하여 연속적으로 측정한 데이터는 일 평균 토양 호흡속도로 산출하였다. 또한, 토양호흡에 대한 토양온도와 수분의 영향은 회귀분석을 이용하여 검정하였고, 모든 자료는 SPSS 12.0을 이용하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 기상 및 토양특성

측정기간 동안 사과원의 일 평균기온은 -7.5~29.5°C 범위에 분포하여 평균 12.5°C이었다. 일 평균지온은 -2.0~26.3°C 범위에서 일변화 및 계절변화를 나타내면서 평균 12.0°C로 기온보다 약간 낮은 수준으로 추이하였다. 연강수량은 평년수준(1267.9mm)이었으나, 7~9월에 200mm이상의 많은 강우가 있었다. 특히 9월 강수량(268.8mm)이 평년(133.5mm)에 비해 2배 정도 많았으며, 평균 토양수분함량은 18.1%이고 7.6~26.9% 수준에서 일변화와 계절변화를 나타내었다.

3.2. 토양호흡속도의 일변화

측정 기간 중 맑은 날(2007년 5월20일~21일)을 선정하여 토양 호흡속도의 일변화와 기온, 지온 및 토양 수분 함량의 일변화를 측정하였다. 그 결과, 온도가 상승하는 7시부터 토양 호흡이 점차 증가하기 시작하여 온도가 가장 높은 14~15시경에 최대값(399.4~450.9mg CO₂ m⁻² h⁻¹)을 나타내었으며 이후 온도의 하강과 함께 토양 호흡속도는 감소하였다(Fig. 3A).

Fig. 3. (A) Daily variations (on 20-21 May 2007) in soil respiration rate (SR), air and soil temperature and soil water content (SWC) and (B) the relationship between soil respiration rate and air temperature or soil temperature.

토양 호흡속도의 일변화는 토양 수분 함량의 변화보다 기온과 지온의 일변화와 유사한 경향을 나타내며 온도 증가에 따라 지수함수적으로 증가하였다. 토양호흡속도는 기온($r^2=0.677$)보다도 지온($r^2=0.805$)과 더 밀접한 상관관계에 있었으며(Fig. 3B), 이는 토양 내 CO₂ 발생의 주요 원인은 주로 표토 안에 위치하므로 지표면으로부터 0.05~0.10m의 깊이의 토양 온도와 밀접하게 관련되어 있기 때문으로 사료된다(Buyanovsky *et al.*, 1986; Rochette *et al.*, 1992; Lessard *et al.*, 1994).

3.3. 토양호흡속도와 환경인자와의 상관관계

실험기간 전체를 통하여 일평균 토양호흡속도와 환경인자와의 상관관계를 검토한 결과, 토양 수분함량과는 낮은 상관관계($r^2=0.160$)를 나타냈으나(Fig. 4B), 지온($r^2=0.800$) 및 기온($r^2=0.805$)과는 높은 상관관계를 나타냈다(Fig. 4A). 그러나 장마기가 있는 7~9월

Fig. 4. Relationships of soil respiration rate with (A) air/soil temperature and (B) soil water content over the whole season, and with those (C and D, respectively) over rainy season (July-September 2007).

에는 지온과의 뚜렷한 상관관계($r^2=0.429$)가 보이지 않았으며(Fig. 4C), 토양수분함량과는 부의 상관관계($r^2=0.379$)를 나타내는 경향이 있었다(Fig. 4D).

일반적으로 토양호흡은 지온에 의해서 일차적으로 주도되고 이들 간에는 상당히 높은 상관관계가 있는 것으로 알려졌다(Son and Kim 1996; Knapp *et al.*, 1998; Mc Hale *et al.*, 1998; Lee and Moon, 2001). 또한 토양 수분 조건의 영향에 관해서는 연구자 및 조사지역에 따라서 다양한 연구결과가 보고되어 있다. 즉, 온대 지역에서는 토양 수분함량이 낮은 조건하에서 토양 호흡속도를 감소시킨다는 보고(Dong *et al.*, 1998; Londo *et al.*, 1999; Kosugi *et al.*, 2005; Mitani *et al.*, 2007)가 있는 반면, 건조조건과 다습조건은 모두 토양 호흡속도를 감소시킨다는 결과(Martin and Bolstad, 2005)와 토양수분은 토양호흡에 유의적인 효과가 없다는 결과도 보고되었다(Fang *et al.*, 1998; Ohashi *et al.*, 1999). 이와 같은 선행연구결과를 종합해 볼 때, 사과원 토양으로부터 연간 방출되는 CO₂(토양호흡)는 토양수분함량보다는 온도와 밀접하게 관련되어 있으나, 장마기간 동안에는 토양온도와 토양 수분 함량의 영향을 모두 받는 것으로 생각된다.

사과원의 토양호흡과 온도와의 관계에 있어서 지수 함수식에 따라 토양 호흡의 온도 민감성 지표로서 Q_{10} 을 검토한 결과, 지온과 기온 대한 Q_{10} 은 각각 2.0과 1.9이었다(Fig. 4A). Raich and Schlesinger(1992)가 보고한 지구 평균 Q_{10} 수치인 2.4보다는 낮은 수치를 나타냈다. 국내의 경기도 광릉지역의 낙엽활엽수림에서의 지온에 대한 Q_{10} 은 3.3(Min, 2006), 경기도 수원지역의 고추경작지에서는 1.9(Lee, 2008)로 보고되어 있다. 따라서, 본 실험에서 측정된 사과원의 Q_{10} 수치는 산림보다는 낮고 고추 경작지와는 유사한 경향을 나타냈다.

토양 호흡에서 Q_{10} 이 높다는 것은 온도변화에 대해 토양미생물과 식물 뿌리의 호흡속도가 높아진다는 것을 의미한다. 식생에 따라 Q_{10} 에 차이를 나타내는 이유는 토양 호흡에 관여하는 요소(뿌리호흡, 균근호흡, 균근, 타가영양체 호흡 등)들의 온도에 대한 민감성이 서로 다르기 때문이다(Bowden *et al.*, 1998). 또한 연간 토양 호흡과 온도와의 관계로부터 평가된 Q_{10} 은 온도 반응 뿐만 아니라 토양 수분 함량, 뿌리 생체량, 낙엽 및 낙지(가지) 유입, 토양 미생물 집단 등의 계절적 차이가 종합된 것이기 때문에(Davidson *et al.*,

Fig. 5. Seasonal changes in soil respiration rate (SR), precipitation, soil water content (SWC) and temperature.

Table 1. Seasonal changes in soil respiratory CO₂ emission and soil temperature

Month-date	Soil CO ₂ efflux		Soil temperature (°C) (Mean±S.D)
	g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹ (Monthly mean±S.D)	g CO ₂ m ⁻² (Monthly sum)	
Apr-07	4.39±1.26	131.8	11.0±2.6
May-07	9.49±1.32	294.1	16.6±1.7
Jun-07	10.69±1.44	320.6	20.9±1.3
Jul-07	6.83±1.48	211.7	22.9±1.2
Aug-07	9.34±2.17	289.5	25.0±1.3
Sep-07	5.91±1.68	177.4	20.5±1.3
Oct-07	5.77±1.07	178.9	14.4±2.9
Nov-07	3.54±0.96	106.3	6.7±2.6
Dec-07	2.27±0.35	70.3	2.3±1.3
Jan-08	1.57±0.31	48.6	-0.4±0.7
Feb-08	1.37±0.31	39.9	-0.9±0.5
Mar-08	2.92±0.86	90.6	5.0±3.1
Annual mean or sum	5.35±3.32	1959.7	12.0±9.1

1998) 식생에 따라 서로 다른 Q_{10} 을 나타내는 것으로 생각된다.

3.4. 연중 토양 호흡량 평가

측정 기간 동안 일별 토양 호흡속도 범위는 0.82~13.65 g CO₂ m⁻² d⁻¹ 이었다(Fig. 5). 사과원 토양으로부터의 CO₂ 방출량은 지온이 상승하기 시작하는 3월부터 증가하여 5월~6월에 가장 높았으며, 장마가 있는 7월~9월 사이에는 토양 온도가 높음에도 불구하고

고 강우의 영향으로 낮은 수준에 머물렀다(Fig. 4D). 이후 기온이 하강하는 가을에는 토양 호흡이 지속적으로 감소하기 시작하여 월평균 지온이 가장 낮은 2월에 가장 낮은 토양 호흡을 나타냈다(Fig. 5, Table 1). 한편, 선행연구결과에 의하면 고추 경작지에서의 토양 호흡은 지온이 가장 높은 9월에 가장 높은 토양 호흡을 나타냈으며(Lee, 2008), 소나무, 굴피나무 및 굴참나무림에서도 토양 온도가 가장 높은 7~8월에 가장 많은 토양 호흡을 나타낸다고 하였다(Moon, 2004).

그러나 본 실험에서는 장마기의 많은 강우로 인한 높은 토양 수분 함량이 토양과 대기 사이의 가스 교환을 제한함으로써 토양 내의 산소 농도가 낮게 유지되었기 때문에 토양 생물군락의 호기성 호흡이 억제된 것으로 판단된다(Davidson *et al.*, 1998). 또한 높은 토양 수분은 식물 뿌리의 호흡 활성을 억제하여 뿌리 생체량과 토양의 가스확산에 영향을 미친다는 연구결과(Adachi *et al.*, 2006)로부터, 장마 기간의 많은 강우는 토양 내 수분함량을 증가시켜 사과원의 토양호흡을 억제시킨 것으로 생각된다.

Shi *et al.*(2006)는 티벳평원 밀 경작지에서의 토양 CO₂ 방출량은 온도가 가장 높을 때보다 엽면적 지수가 최대이고 살아있는 뿌리생체량이 가장 많은 5~6월의 개화 기간에 최고였으며 엽면적 지수보다는 뿌리생체량과 토양 호흡속도간에 더 높은 상관관계가 있음을 보고하였다. 따라서 온도가 낮은 5~6월의 높은 토양 호흡과 온도가 높은 7~9월의 낮은 토양 호흡의 차이는 단순히 온도와 토양 수분 함량과의 영향뿐만 아니라 사과나무의 생물기후학의 영향까지 모두 고려한 종합적인 이해가 필요할 것으로 판단된다.

사과원 토양으로부터 토양호흡에 의해 연간 방출된 CO₂는 19.6t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ 이었다(Table 1). 국내의 강원지역 굴참나무림과 신갈나무림의 헥타르당 연간 토양 호흡량이 각각 33.7t과, 34.2t 이었으며(Yi, 2003), 경기도 광릉 지역의 온대 낙엽활엽수림에서는 27.1t(Min, 2006), 경기도 수원 지역의 고추경작지에서는 17.2t(Lee, 2008)이었다. 본 실험에서의 사과원 토양으로부터 토양호흡에 의해 연간 방출되는 CO₂량은 산림보다 약 27~42% 정도 적고, 일년생 작물인 고추 경작지보다는 약 12% 정도 높은 수준이었다.

식생마다 연간 발생되는 토양 호흡량 차이는 토양 호흡에 영향을 미치는 온도와 토양 수분 등의 영향력이 서로 다르고 토양 호흡에 관여하는 요소들의 온도에 반응하는 민감성이 서로 다르기 때문으로 생각된다. 또한 Raich and Nadelhoffer(1989)는 토양 호흡량과 지상부 식생으로부터 유입되는 낙엽량 간에 정의 상관관계가 있다고 하였으며, Kim(1996)은 지상부에서 공급되는 유기물량의 차이가 토양 호흡량의 차이를 가져올 수 있다고 하였다. 즉, 고추와 같은 일년생 작물들은 수확 후, 잔사물은 대부분 소각되기 때문에 토양에 유입되는 유기물량이 상당히 적으며 사과원 역시 산림에 비해 상대적으로 그 양이 적기 때문에 토양 호흡

량이 적은 것으로 생각된다.

또한 토양호흡은 기상환경조건의 영향을 받기 쉽기 때문에(Kurganova *et al.*, 2003) 측정기간 동안의 집중 강우와 같은 기상환경이 토양 호흡에 영향을 미친 것으로 생각된다.

IV. 적 요

본 실험은 사과원 토양으로부터의 CO₂ 방출량을 정량적으로 파악하고, 토양호흡과 환경인자와의 관계를 알아보기 위해 수행되었다. 실험은 경기도 수원 국립원예특작과학원 내의 사과 '후지' 과수원에서 2007년 4월 23일~2008년 3월 31일까지 실시하였다. 자체 제작한 자동 토양호흡 측정장치(밀폐법)를 이용하여 밀폐법에 근거하여 사과원의 토양 호흡을 지속적으로 측정하였다. 토양 호흡속도의 일변화는 일출 이후의 온도 상승과 함께 아침 7시경부터 증가하여, 온도가 가장 높은 14~15시경에 최대값(399.4~450.9mg CO₂ m⁻² h⁻¹)을 나타내었으며 이후 온도의 하강과 함께 감소하였다. 토양 호흡속도는 0.82~13.65g CO₂ m⁻² d⁻¹ 범위의 계절변화를 보였고, 온도가 높고 강우가 많았던 7~9월에는 비교적 온도가 낮았던 5~6월보다 토양호흡속도가 낮았다. 토양호흡속도는 지온($r^2=0.800$) 및 기온($r^2=0.805$)과 유의한 지수함수적 관계를 보였다. 지온과 기온에 대한 토양호흡속도의 Q₁₀ 값은 각각 2.0과 1.9이었으며, 연간 총 토양 호흡량은 19.6ton CO₂ ha⁻¹ 이었다.

REFERENCES

- Adachi, M., Y. S. Bekku, W. Rashidah, T. Okuda, and H. Koizumi, 2006: Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. *Applied Soil Ecology* **34**, 258-265.
- Boone, R. D., K. J. Nadelhoffer, J. D. Canary, and J. P. Kaye, 1998: Root exerts a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature* **396**, 570-572.
- Bowden, R. D., K. M. Newkirk, and G. Rullo, 1998: Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil biology and Biochemistry* **30**, 1591-1597.
- Buchmann, N., 2000: Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry* **32**, 1625-1635.
- Bunnell, F. L., D. E. N. Tait, and K. Van Cleve, 1977:

- Microbial respiration and substrate weight loss, 1. A general model of the influences of abiotic variables. *Soil Biology and Biochemistry* **9**, 3-40.
- Buyanovsky, G. A., G. H. Wagner, and C. J. Grantzer, 1986: Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil science society of America Journal* **50**, 338-344.
- Buyanowsky, G. A., and G. H. Wagner, 1983: Annual cycles of carbon dioxide level in soil air. *Soil science society of America Journal* **47**, 1139-1145.
- Davidson, E. A., E. Belk, and R. D. Boone, 1998: Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest. *Global Change Biology* **4**, 217-227.
- Dong, Y., D. Scharffe, J. M. Lobert, P. J. Crutzen, and E. Sanhueza, 1998: Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from a temperate forest soil: the effects of leaves and humus layers. *Tellus* **50B**, 243-252.
- Fang, C., J. B. Moncrieff, H. L. Gholz, and K. L. Clark, 1998: Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant Soil* **205**, 135-146.
- Gough, C. M., and J. R. Siler, 2004: The influence of environmental, soil carbon, root, and stand characteristics on soil CO₂ efflux in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations located on the South Carolina Coastal Plain. *Forest Ecology and Management* **191**(5), 353-363.
- Hongxing, Z., W. Xiaoke, F. Zongwei, S. Wenzhi, L. Wenzhao, and O. Zhiyun, 2007: Multichannel automated chamber system for continuous monitoring of CO₂ exchange between the agro-ecosystem or soil and the atmosphere. *Acta Ecologica Sinica* **27**(4), 1273-1282.
- Jassal, R. S., and T. A. Black, 2006: Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration using small-area trenched plot technique: Theory and practice. *Agricultural and forest meteorology* **140**, 193-202.
- Kim, J. S., 1996: Biomass and distribution of nitrogen and phosphorus for *Pinus rigida*, *Larix leptolepis*, and *Quercus serrata* stands in Yangpyeong Area. Ph.D. Thesis Korea University.
- Knapp, A. K., S.L. Conard, and J. M. Blair, 1998: Determination of soil CO₂ flux from a subhumid grassland: Effects of fire and fire history. *Ecological application* **4**, 760-770.
- Kosugi, Y., H. Tanaka, S. Takanashi, N. Matsuo, N. Ohte, S. Shibata, and M. Tani, 2005: Three years of carbon and energy fluxes from Japanese evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 329-343.
- Kurganova, I., V. Lopes de Gerenyu, L. Rozanova, D. Saponov, T. Myakshina, and V. Kudeyarov, 2003: Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils. *Tellus* **55B**, 338-344.
- Lee, J. H., 2008: Effect of carbonization of agricultural product on increasing of carbon sequestration in red pepper soil. Master Thesis. Konkuk University.
- Lee, Y. Y., and H. T. Moon, 2001: A study on the soil respiration in a *Quercus acutissima* forest. *Journal of Ecology and Field Biology* **24**(3), 141-147.
- Lessard, R., P. Rochette, E. Topp, E. Pattey, R. L. Deshardins, and G. Beaumont, 1994: Methane and carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites. *Canadian Journal of Soil Science* **74**, 139-146.
- Linn, D. M., and J. W. Doran, 1984: Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. *Soil Science Society of America Journal* **48**, 1267-1272.
- Lloyd, J., and J. A. Taylor, 1994: On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* **8**, 315-323.
- Londo, A. J., M. G. Messina, and S. H. Schoenholz, 1999: Forest harvesting effects on soil temperate, moisture and respiration in a bottomland hardwood forest. *Soil science society of America Journal* **63**, 637-644.
- Martin, J. G., and P. V. Bolstad, 2005: Annual soil respiration in broadleaf forests of northern Wisconsin influence of moisture site biological chemical physical characteristics. *Biogeochemistry* **73**, 149-182.
- Mc Hale, P. J., M. J. Mitchell, and F. P. Bowles, 1998: Soil warming in a northern hardwood forest; trace gas fluxes and leaf litter decomposition. *Canadian Journal of Forest Research* **28**, 1365-1372.
- Min, Y. K., 2006: Characteristics on the soil carbon flux in the cool-temperate deciduous forest at Gwangneung. Master Thesis. Konkuk University.
- Mitani, T., Y. Kosugi, K. Osaka, S. Ohkubo, S. Takanashi, and M. Tani, 2007: Spatial and temporal variability of soil respiration rate at a small watershed revegetated with Japanese cypress. *Journal of the Japanese Forest Society* **88**, 496-507.
- 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* **7**(1), 57-65.
- Nakayama, F. S., 1990: Soil respiration. *Remote Sensing Reviews* **5**(1), 311-321.
- Nishimura, S., S. Sudo, H. Akiyama, S. Yonemura, K. Yagi, and H. Tsuruta, 2005: Development of a system for simultaneous and continuous measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from croplands based on the automated closed chamber method. *Soil Science and Plant Nutrition* **51**(4), 557-564.
- Ohashi, M., K. Gykusen, and A. Daito, 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.
- Raich, J. W., and K. J. Nadelhoffer, 1989: Belowground carbon allocation in forest ecosystem : Global trends. *Ecology*

- 70, 1346-1354
- Raich, J. W., and W. H. Schlesinger, 1992: The global carbon dioxide efflux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* **44B**, 81-99.
- Rastogi, M., S. Singh, and H. Pathak, 2002: Emission of carbon dioxide from soil. *Current science* **82**, 510-517.
- Rochette, P., R. L. Deshardins, E. G. Gregorhch, E. Patty, and R. Lessard, 1992: Soil respiration in barely (*Hordeum vulgare* L.) and fallow fields. *Canadian Journal of Soil Science* **72**, 591-603.
- Shi, P. L., X. Z. Zhang, Z. M. Zhong, and H. Ouyang, 2006: Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology* **137**, 220-233.
- Son, Y. H., and H. W. Kim, 1996: Soil respiration in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantation. *Journal of Korean Forestry Society* **85**, 496-505.
- Tufekcioglu, A., J. W. Raich, T. M. Isenhardt, and R. C. Schultz, 2001: Soil respiration within riparian buffer and adjacent crop fields. *Plant and Soil* **229**, 117-124.
- Yi, M. J. 2003: Soil CO₂ evolution in *Quercus variabilis* and *Q. mongolica* forests in Chunchon, Kangwon province. *Journal of Korean Forestry Society* **92**(3), 236-269.