

배 재배지의 탄소수지 산정에 관한 연구

서상욱 · 최은정 · 정현철 · 이종식 · 김건엽 · 이재석¹ · 소규호*

국립농업과학원 기후변화생태과, ¹건국대학교 생명과학과

The Study on Carbon Budget Assessment in Pear Orchard

Sanguk Suh, Eunjung Choi, Hyuncheol Jeong, Jongsik Lee, Gunyeob Kim,
Jaeseok Lee¹ and Kyuho Sho*

*Climate Change & Agroecology Division, National Academy of Agricultural Science,
Wanju 565-851, Korea*

¹*College of Bioscience and Biotechnology, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea*

Abstract - This study was conducted to find out the methodology of carbon budget assessment among soil, atmosphere and plant. Soil respiration, net ecosystem productivity of herbs and net ecosystem productivity of woody plants have been measured in 30 years old pear orchard at Naju. Closed Dynamic Chamber (CDC) method was used to measure soil respiration and net ecosystem productivity of herbs. Net ecosystem productivity of woody plant (pear) was determined by eddy covariance method using the EddyPro (5.2.1) program. As for soil respiration, 429.1 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ was released to atmosphere and sensitivity of soil temperature (Q₁₀) was 2.3. In case of herbs, respiration was superior to photosynthesis during measurement period. From 20 to 24 Jun 2015, the sum of absorbed and released CO₂ by herb's photosynthesis and respiration was 156.1 mg CO₂ m⁻² h⁻¹. Woody plants showed the 680.1 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ of absorption by photosynthesis. In a farm scale, the sum of soil respiration, and net ecosystem productivity of herbs and woody plants was 0.04 ton CO₂ ha⁻¹ during the measurement period, and it showed that pear orchard act as a CO₂ sink. This study using various approaches is expected to present a methodology for evaluating the carbon budget of perennial woody crop plantations.

Key words: soil respiration, net ecosystem productivity, eddy covariance, pear orchard

서 론

산업혁명 이후 화석연료 사용 증가와 더불어 삼림벌채, 농경지 변환 등의 인간 활동에 의한 토지이용 변화는 안정적이던 대기 중 CO₂ 농도를 280 ppm에서 매년 약 1.5 ppm씩

증가시키고 있다. 이러한 원인으로 인하여 매년 약 3.4 Pg의 탄소가 매년 대기 중에 축적되고 있는 것으로 알려져 있다 (IPCC 2001; IPCC 2007). 최근 10년간의 대기 중 CO₂ 증가율은 약 1.9 ppm으로 가장 높은 수준을 보이고 있으며, 전 지구적 온실가스 농도는 약 35% 증가하였다 (IPCC 2007). 대기 중의 CO₂ 농도 증가는 지구표면에서 반사되는 지구복사를 지구표면으로 재반사하여 지표면과 대기를 가온시킬 뿐만 아니라 물 순환에도 영향을 준다. 따라서, 전 지구적 탄소순환의 비가역적인 변화와 더불어 전 지구적 기후변화를

* Corresponding author: Kyuho Sho, Tel. 063-238-2487,
Fax. 063-238-3823, E-mail. sanguk07@gmail.com

초래하여 이상기후 현상이 빈번하게 나타나고 있다 (Rosenzweig and Hillel 1998). 지구온난화를 유발시키는 CO₂는 기후변화에 대한 영향력이 매우 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 생태계에서의 CO₂ 흡수원과 발생원 간 탄소순환, 그리고 탄소 축적량 평가의 각 요소들 간 명확한 흐름을 파악하는 것이 급격한 기후변화에 대응하는 데 매우 중요하다.

육상생태계는 크게 토양권과 식생권으로 구분할 수 있으며 (Kim and Kim 1998; Lee 2012), 연간 육상생태계로 유입되는 탄소의 양은 약 $2 \pm 1 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 으로 추정되고 있다 (IGBP 1998). 이 중 토양권은 식생의 약 3배, 대기의 약 2배에 달하는 막대한 양의 탄소를 축적하고 있으며 (Waring and Running 1995), 토양권으로부터 연간 75 Pg의 탄소가 토양호흡의 형태로 대기 중으로 배출되기 때문에 전 지구적 탄소순환에서 매우 중요한 역할을 하고 있다 (Bond-lamberty *et al.* 2004). 따라서 토양권 탄소의 동태 파악은 향후 전 지구적 탄소순환의 메커니즘과 양적 순환관계를 파악하고 예측하는 데 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다 (Raich and Schlesinger 1992). 또한 산림, 초지, 습지, 농경지 같은 다양한 육상생태계의 식생과 대기 간에 교환되는 CO₂ 플럭스를 정량화하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다 (Baldocchi *et al.* 2001; Baldocchi 2008). 산림생태계는 육상생태계 중 가장 큰 탄소 저장고로서 탄소수지 연구의 주 대상이며 (McCarl and Schneider 2001), 다양한 관리기술과 적응 연구를 통해 전 지구적 탄소순환과 더불어 기후변화에 따른 비가역적인 반응 등을 완화시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.

육상생태계 중 농업생태계의 경우 인위적인 재배활동과 구성 요인들 간의 복잡한 상호관계 때문에 탄소흡수원으로 인정받지 못하고 있다. 이러한 이유로 농업생태계를 대상으로 한 탄소배출권과 관련한 탄소수지 연구는 활발히 진행되지는 않았다고 볼 수 있다. 그러나 IPCC (2006)의 농업분야 온실가스 배출권 측정에 대한 새로운 지침에서 일년생 작물은 인정하지 않으나 영년생 목본류 작물의 탄소흡수가 인정되면서 탄소흡수원에 대한 평가연구가 활발히 진행되고 있다. IPCC 지침 (IPCC 2006)에 따르면 Tier 1에서는 영년생 목본류 작물의 단순 생체 중의 변화량을 제시하도록 하였으며, Tier 2에서는 탄소의 변화량, Tier 3는 Tier 2와 더불어 재배지 관리를 포함한 지역적인 특성과 통계적인 방법을 포함한 정밀한 측정을 요구하고 있다.

2012년 통계에 따르면 국내 과수의 재배면적은 2,419.3 km²로 전체 농경지의 14%에 달하고 있다 (KOSIS 2012). 따라서 온실가스 흡수 효과가 기대되는 과수원에서 영년생 과수의 탄소 저장량과 더불어 토양권 그리고 대기권 간의 탄소수지에 대한 연구가 시급한 실정이다.

이에 본 연구에서는 IPCC 2006 지침에 의거하여 과수와 토양, 대기 간의 탄소수지 산정 방법론을 제시하고자 전남 나주시의 배 재배농가를 대상으로 토양 호흡량과 초본류, 그리고 과수의 생태계 순생산량을 측정하였다.

재료 및 방법

본 실험의 대상지역은 전라남도 나주시 봉황면 옥곡리에 위치한 배 과수원으로 위도 34°57'11.59", 경도 126°45'05.30"에 위치하고, 고도는 28 m이다. 재배면적은 약 1.2 ha이며, 평균 수고 3~4 m인 30년생 신고배 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Nitaka)가 6.0×4.0 m 간격으로 평균 임분밀도가 약 716 tree ha⁻¹로 재배되고 있다. 시비처리 및 관수관리 등의 일반적인 관리는 농촌진흥청 배나무 표준재배법에 준하였다 (RDA 2000). 배 과원의 토양의 토성은 미사질 식토 (silty caly), 발토양의 유기물 함량은 32.0 g kg⁻¹, TOC (total organic carbon) 함량은 18.6 g kg⁻¹, 전용적밀도는 1.38 Mg m⁻³이었다. 2014년 기준 연평균 기온은 13.0°C이며, 연평균 강수량은 1,349.5 mm이었다.

임상 하부에 자생하는 초본류로는 7과 9속 10종 1변종을 포함하는 11분류군의 식물종이 생육하고 있다. 11종류의 식물 중 45.5%가 동계 일년초이었고, 상대기여도 (r-NCD) 분석 결과 별꽃 (*Stellaria media* (L.) Vill.)과 큰개불알풀 (*Veronica persica* Poir.)이 가장 우점하고 있었다. 대기 중의 온·습도는 임상 내 1.5 m 지점에 HMP155A (Vaisala, Helsinki, Finland)를 이용해 측정하였다. 강우센서 (TE525MM, Campbell Scientific, Logan, UT)와 광량자센서 (Li-Cor 190SB, Campbell Scientific, Logan, UT)는 지상 10 m 위치에 설치하였으며, 지온 (108, Campbell Scientific, Logan, UT) 및 토양수분센서 (CS616, Campbell Scientific, Logan, UT)는 지하 10 cm에 매설하였다. 모든 기상데이터는 10초마다 측정하여 10분마다 측정치를 데이터로거 (CR1000, Campbell Scientific, Logan, UT)에 기록하였다.

토양호흡속도 (Soil respiration rate: Rs)는 휴대용 토양호흡측정기 GMP343 (Vaisala, Helsinki, Finland)을 이용하여 총 36개 지점을 대상으로 2014년 3월부터 월 2회 이상 측정하였다. 측정 지점에는 직경 10 cm, 높이 20 cm 아크릴재질의 collar를 매설하였다. 측정 시에는 collar를 덮어 GMP343을 고정시킬 수 있는 윗 덮개를 직경 10 cm, 높이 30 cm로 제작하여 사용하였다. 측정은 collar 설치로 인한 토양 간섭 등이 안정화되는 시기를 고려하여 약 3주 후부터 진행하였다. 측정은 일 평균 기온을 대표할 수 있는 10시와 16시를 기준으로 하여 각 체임버당 10분간 측정하였으며, 5초 간격으로 데이터가 측정된 후 30초마다 데이터를 저장하였다.

CO₂ 배출량 계산에는 밀폐법(CDC)을 이용하여 단위면적에서 단위시간당 배출되는 CO₂의 양을 계산하였다(Bekku *et al.* 1995).

토양 호흡량과 초본류 생태계 순생산량(Net ecosystem productivity of herb: NEP_h) 측정은 Automatically Open-Closed Chamber system(AOCCs; Suh *et al.* 2006) 중 체임버부를 변형하여 진행하였다. AOCC 시스템은 체임버부, 펌프부, 전력분배부의 3개 주요 부분으로 구성되어 있다. 이 중 체임버부를 원통형의 지름 30 cm, 높이 30 cm의 형태로 변형하여 체임버 내부에 초본류의 생육이 가능하도록 하였다. 총 6개의 체임버는 10분 간격으로 순차적으로 작동하여 1시간이면 6개의 체임버가 모두 측정되어 1 사이클이 완성된다. Closed Dynamic Chamber(CDC) 방법으로 측정된 토양호흡속도는 일정시간 동안 체임버에서 유출되는 공기의 CO₂ 농도를 측정 후 단위면적당 농도의 변화율로 변환하여 토양호흡속도를 계산하였다. 2015년 과원에 설치된 총 6개의 체임버 중 3개의 체임버는 토양호흡속도를, 나머지 3개의 체임버는 초본류의 광합성 및 호흡량을 포함한 초본류 생태계 순생산량을 측정하였다.

과수의 생태계 순생산량(Net ecosystem productivity of woody plant: NEP_w) 측정은 10 m 타워에 설치된 개방형 CO₂/H₂O 적외선가스분석기(LI-7500, LI-COR Biosciences Inc., USA)와 3차원 초음파풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)를 이용하여 2015년 6월부터 초당 10회 측정하여 풍속과 CO₂ 농도의 30분 평균에 대한 편차를 공분산하였다. 또한 측정된 CO₂ 플럭스는 EddyPro 5.2.1 프로그램(LI-COR Biosciences Inc., USA)을 이용하여 계산하였다.

결과 및 고찰

배 과수원에서 2014년 3월부터 2015년 7월까지 측정된 토양 호흡량과 대기온도 변화는 Fig. 1과 같다. 2014년 3월부터 2015년 7월까지의 배 과수원의 측정시기별 토양 호흡량은 기온(Ta) 변화와 유사하였다. 월평균 기온이 5°C 이하인 2014년 12월부터 2015년 2월까지 토양 호흡량은 평균 96 mg CO₂ m⁻² h⁻¹이었으나 기온이 상승한 8월에는 최대 949.4 mg CO₂ m⁻² h⁻¹로 약 10배가 증가하였다. 월별 기온에 따른 토양 호흡량의 변화 추이는 전형적인 연간 토양호흡 배출특성을 잘 보여주고 있다. 본 연구결과에서는 평균 429.1 mg CO₂ m⁻² h⁻¹의 CO₂가 토양권으로부터 대기권으로 배출되고 있으며, 이는 태화산 잣나무림에서 토양호흡 형태로 배출되는 424.4 mg CO₂ m⁻² h⁻¹의 CO₂(Suh *et al.* 2014)와 유사한 수준이었다.

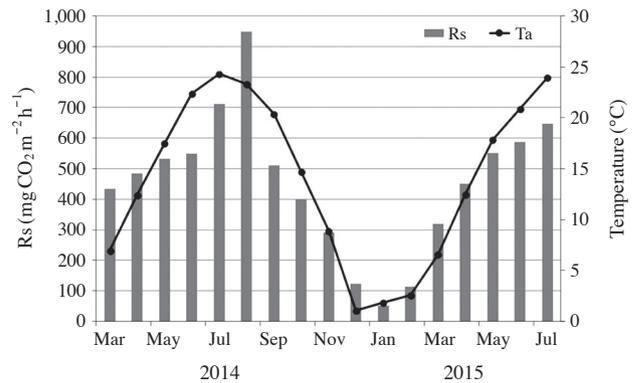


Fig. 1. Annual change of soil respiration rate (Rs) and air temperature (Ta) from 2014~2015 at Naju pear orchard.

2014년 7월과 2015년 7월의 경우 기온은 각각 24.3, 24°C로 유사하였으나, 토양 호흡량은 711.3, 646.4 mg CO₂ m⁻² h⁻¹로 2015년이 2014년 대비 약 10%가 감소하였다. 같은 시기의 강수량을 비교해 보면, 494.5 mm month⁻¹와 155 mm month⁻¹로 2015년 강수량도 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 토양수분이 부족할 경우, 약 50%의 토양 호흡량이 감소한다고 보고한 Tamai (2009)의 결과와 일치하였다. 그러나 Suh *et al.* (2014)에 따르면 일평균 10 mm 이하의 강우 발생 시 토양 호흡량은 약 20.0% 증가하지만 10 mm 이상의 강우에서도 토양 호흡량이 감소하는 현상을 보고한 바 있다. 이를 고려할 때 2014년 7월 강수량이 2015년에 비하여 3배 이상 증가하였기에 토양 호흡량이 감소하여야 하지만 오히려 10% 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향치는 강우 패턴을 고려해볼 때 2014년 7월의 경우 2일에 걸쳐 300 mm에 가까운 강우가 내렸던 시기를 제외하고, 10 mm 안팎의 강우가 15일만에 걸쳐 골고루 분포하였기 때문에 오히려 토양 호흡량이 증가한 것으로 생각된다.

토양호흡속도의 계절적 변동성은 일반적으로 지온의 변화에서 기인한 것으로 보고있으며, 충분한 토양수분 환경 하에서 토양 호흡량은 지온의 증가에 따라 지수함수적으로 증가하는 것으로 알려져 있다 (Hubbard *et al.* 2005; Rachhpal *et al.* 2008). 토양호흡속도에 영향을 미치는 주요 환경인자 중 온도는 토양미생물의 활성 및 토양유기물 등의 분해에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 이는 온도 10°C 상승 시 반응속도의 증가분을 비교한 변수인 Q₁₀값으로 표현되고 있다. Q₁₀값을 이용한 모델식은 다양한 생태계에서의 토양 호흡량을 계산하는 데 활용되고 있다 (Fang and Moncrieff 2001; Falge *et al.* 2002). 전체 측정기간 동안 기온 및 지온(Ts)의 증가와 함께 토양 호흡량도 증가하는 경향을 보였으며, 개략적으로 5월부터 8월까지 지온이 급격히 상승하는 것과 함께

토양 호흡량도 급격히 증가하여 8월에 최고 높은 값을 나타냈다. 그리고 9월 이후 접어들며 지온이 저하함에 따라 토양 호흡량도 감소하기 시작하는 경향을 보였다. 이러한 기온 및 지온과 토양 호흡량과의 상관관계는 높은 양의 상관관계를 보였다 (Fig. 2). 전남 나주시 배 과원에서 토양 호흡량과 온도에 대한 민감성을 나타내는 토양온도민감도 (Q_{10})는 2.3이었다.

Fig. 3은 배 과수원에서 2015년 6월 12일부터 17일까지 측정된 토양 호흡량 및 초본류의 생태계 순생산량을 나타낸 것이다. 토양 호흡량의 경우, 측정기간 평균치가 $509.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 휴대용 측정장비를 이용하여 측정된 $587.4 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 보다 약 13% 낮게 나타났다. 이는 자동측정 시스템 데이터는 6월 중순에 측정된 값으로 기온이 점차 상승하는 6월 하순의 토양 호흡량 값이 반영되지 않은 원인으로 생각된다. 초본류의 생태계 순생산량은 19~20시경부터

5~6시경까지는 $1,000 \sim 1,200 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 매우 높게 나타났다. 이는 토양에서 토양호흡의 형태로 배출되는 CO_2 뿐만 아니라 초본류 식물체가 호흡을 하면서 대기 중으로 배출되는 CO_2 가 포함되었기 때문으로 생각된다. 6월 12일 3시의 경우 토양 호흡량은 $593.6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 토양호흡과 초본류의 호흡량을 포함한 초본류 생태계 순생산량은 $1099.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 나타나, 이를 통해 초본류의 순호흡량이 $506.2 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 임을 유추할 수 있다. 해가 뜨는 7시경 이후부터는 초본류의 광합성작용이 활발해지면서 대기 중으로 배출되는 CO_2 의 양이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 6월 12일 13시의 경우 토양 호흡량은 $653.6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 초본류 생태계 순생산량은 $616.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 나타나 $36.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 이 초본류의 광합성에 의해 흡수됨을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 3의 화살표에서 보듯이 14시경에는 전반적으로 대기 중으로 배출되는 CO_2 의 배출량이 일시적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 식물이 하루 중 기온이 최고에 달하는 14시경이면 식물체 내 수분 증발현상을 막기 위하여 기공을 닫아 광합성 현상이 일시적으로 중단되어 CO_2 가 증가하는 데 원인이 있다고 판단된다. 6월 17일의 경우 오전부터 흐린 날씨에 오후부터는 비가 내리기 시작하면서 광합성 작용을 통한 CO_2 의 흡수가 일어나지 않은 것으로 생각된다.

배 과수원에서 2015년 6월 20일부터 24일까지 측정된 배의 생태계 순생산량은 Fig. 4와 같다. 개방형 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 적외선가스분석기와 3차원 초음파풍속계는 2015년 6월 이후 데이터부터 저장되기 시작하였다. 6월 20일부터 24일까지의 데이터를 분석해 보면, 맑은 날은 배 과수 및 초본류의 광합성에 의한 대기 중으로부터의 CO_2 가 흡수되고, 흐린 날 및 밤 시간대에 호흡과 토양호흡에 의한 토양으로부터 대기로

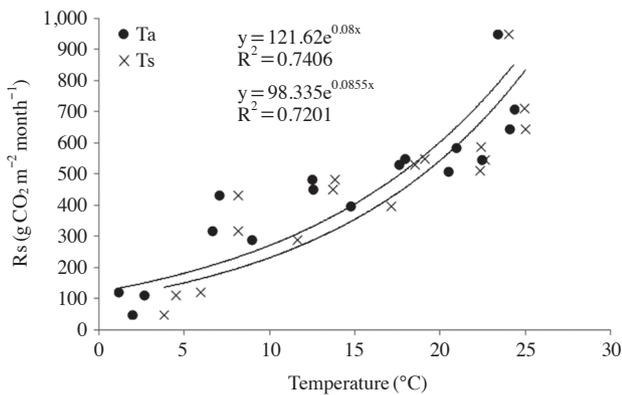


Fig. 2. Relationship between soil respiration rate (R_s) and air temperature (T_a) and soil temperature (T_s) at 5 cm depth from 2014~2015 at Naju pear orchard.

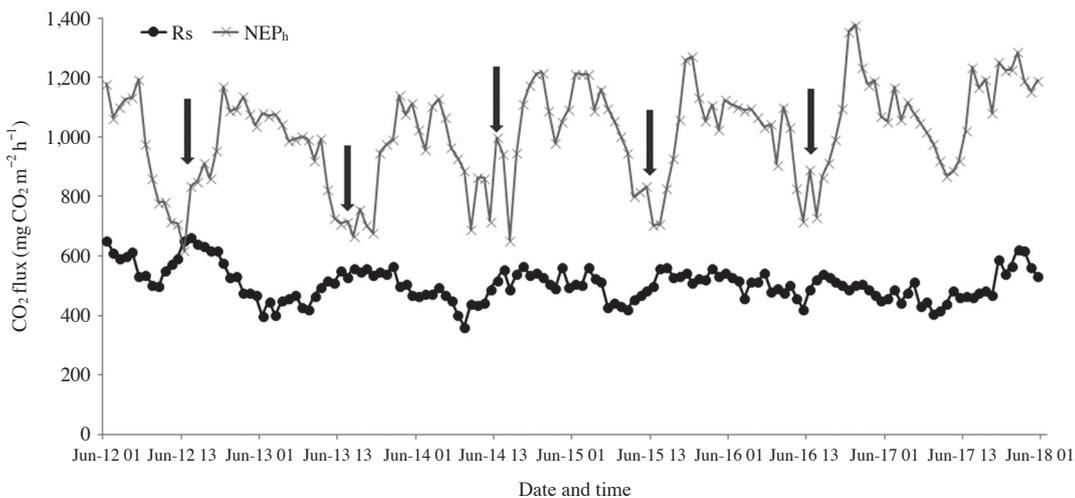


Fig. 3. Diurnal variation of soil respiration rate (R_s) and NEP of herb (NEP_h) from 12 June to 17 June 2015.

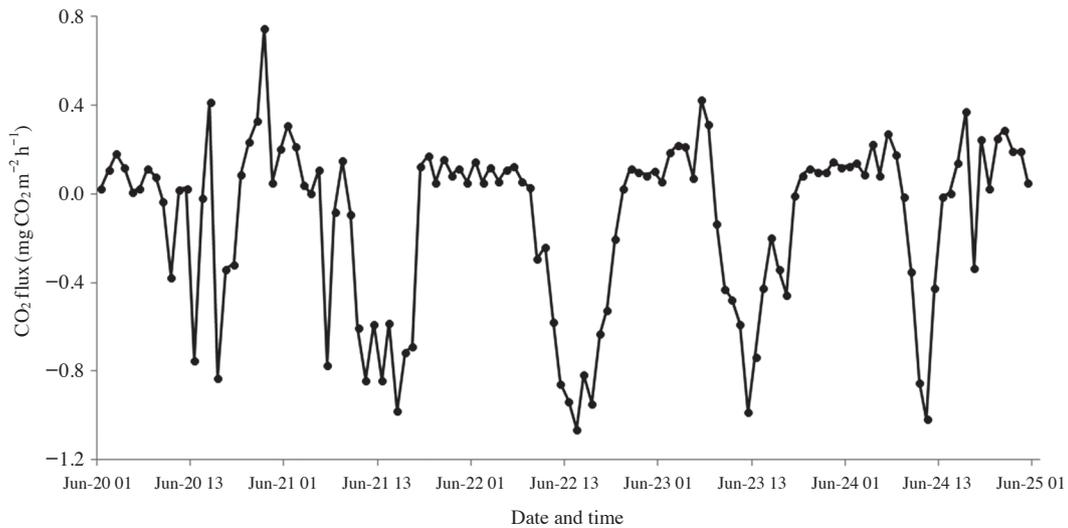


Fig. 4. NEP of pear orchard from 20 June to 24 June 2015.

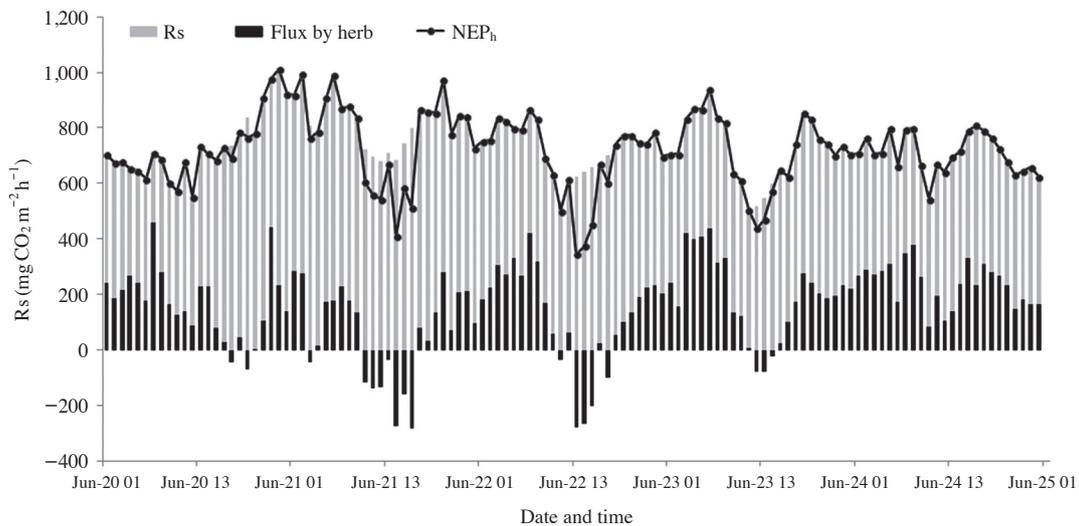


Fig. 5. Calculated herbs photosynthesis and respiration using NEP_h and soil respiration (R_s). The filled bar under 0 value means photosynthesis and over 0 value means respiration by herbs.

CO_2 가 배출되는 경향을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 측정기간 동안 $406.3 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 CO_2 가 대기 중으로부터 흡수됨을 확인할 수 있었다.

이는 배 과수와 초본류의 광합성 및 호흡 그리고 토양 호흡량을 모두 포함하여 계산한 값으로 배 과수에 의한 광합성 및 호흡량만을 직접적으로 계산할 수는 없다. 그러나 Fig. 1과 3에서 측정된 토양 호흡량 데이터와 초본류 생태계 순생산량 데이터와의 비교분석을 통해 배 과수에 의해서 흡수, 배출된 CO_2 의 양을 유추할 수는 있다.

우선 초본류의 생태계 순생산량과 토양 호흡량과의 차이를 통해 초본류의 광합성량과 호흡량을 구분할 수 있다 (Fig.

5). 비교적 날씨가 맑았던 6월 21일과 22일의 경우 11시부터 15시 사이에 초본류에 의한 광합성이 뚜렷이 관찰되었다. 2015년 6월 20일부터 24일까지 초본류의 광합성 또는 호흡량을 통해 흡수 및 배출된 CO_2 의 총합은 $156.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 상대적으로 광합성보다는 호흡이 더 많은 것으로 나타났다. 이는 초본류의 경우 목본류의 잎이 없거나 상대적으로 적은 시기인 3~4월 사이에 최대한 성장을 하기 때문에 6월에는 3~4월과 비교하여 광합성보다는 호흡량이 더 많았던 것으로 생각된다.

배 과수의 광합성과 호흡에 의한 CO_2 의 흡수 및 배출 양상은 Fig. 6과 같다. 2015년 6월 20일부터 24까지의 CO_2 흡

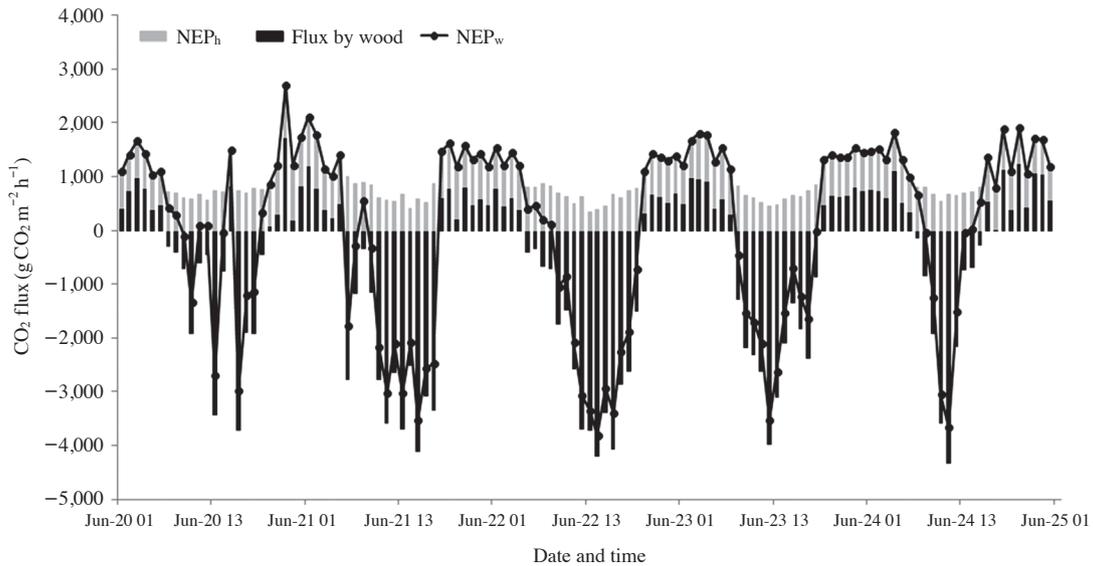


Fig. 6. Calculated woody plant photosynthesis and respiration using NEP_w and NEP_h . The filled bar under 0 value means photosynthesis and over 0 value means respiration by woody plant (pear).

수와 배출 양상을 분석해 보면 우선 광합성에 의한 CO_2 의 흡수가 우세한 것으로 나타났다. 이는 8월경 가장 높은 엽면적지수를 갖기 위해 이 시기에 성장을 활발하다는 것을 의미한다. 이 기간 동안 배 과수의 생태계 순생산량은 $-680.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 배 과원 단위의 토양 호흡량과 초본류 및 배 과수의 광합성과 호흡량의 총합은 $-0.04 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ 로 배 과원은 CO_2 흡수원이었다.

결론적으로 본 연구는 기술개발의 초기 단계로 충분한 데이터가 누적되지 않아 현 시점에서 다양한 분석은 미흡한 부분이 있다. 그러나 초본류 및 과수의 바이오매스 측정과 같은 생태학적인 접근방법, 체임버법을 이용한 CO_2 의 직접 측정방법, 그리고 개방형 적외선 CO_2 분석기와 3차원 초음파풍속계 등을 이용한 미기상학적인 방법을 활용한 지속적인 연구는 배 과원 단위의 생태계 구성요소들 간의 CO_2 흐름을 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

적 요

본 연구는 IPCC (2006)의 농업분야 온실가스 배출권 측정의 새로운 지침에 의거하여 과수와 토양, 대기 간의 탄소수지 산정 방법론을 제시하고자 전남 나주시의 배 재배농가를 대상으로 토양 호흡량과 초본류, 그리고 과수의 생태계 순생산량을 측정하였다. 토양 호흡량 및 초본류 생태계 순생산량은 Closed Dynamic Chamber (CDC) 방법으로 측정하였고, 배 과수의 생태계 순생산량은 EddyPro 5.2.1 프로그램을 이

용하여 공분산법으로 측정하였다. 배 과수원의 토양 호흡량으로 연간 $429.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 이 배출되었으며, 토양온도민감도 (Q_{10})는 2.3으로 나타났다. 초본류의 경우 측정기간 동안 호흡이 광합성보다 우세하게 나타났다. 2015년 6월 20일부터 24일까지 초본류의 광합성 또는 호흡을 통해 흡수 및 배출된 CO_2 의 총합은 $156.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 상대적으로 호흡이 더 많았던 것으로 나타났다. 배 과수의 광합성 또는 호흡에 의한 CO_2 총합은 $-680.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 광합성에 의해 CO_2 가 흡수되었다. 배 과원 단위의 토양 호흡량과 초본류 및 배 과수의 광합성 및 호흡량의 총합은 $-0.04 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ 로 CO_2 의 흡수원이었다. 결론적으로 배 과원에서의 다양한 접근방법을 통한 향후 다년생 목본 작물 재배지에서의 탄소수지 산정 방법론 제시에 꼭 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ010036)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

Baldocchi D, E Falge, L Gu, R Olson, D Hollinger, S Running,

- P Anthoni, C Bernhofer, K Davis, R Evans, J Fuentes, A Goldstein, G Katul, B Law, X Lee, Y Malhi, T Meyers, W Munger, W Oechel, UKT Paw, K Pilegaard, HP Schmid, R Valentini, S Verma, T Vesala, K Wilson and S Wofsy. 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *J. Clim.* 82:2415-2434.
- Baldocchi D. 2008. Breathing of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Aust. J. Bot.* 56:1-26.
- Bekku Y, H Koizumi, T Nakadai and H Iwaki. 1995. Measurement of soil respiration using closed chamber method: An IRGA technique. *Ecol. Res.* 10:369-373.
- Bond-Lamberty B, C Wang and ST Gower. 2004. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiol.* 24:1387-1395.
- Falge E, D Baldocchi, J Tenhunen, M Aubinet, P Bakwin, P Berbigier, C Bernhofer, G Burba, R Clement, KJ Davis, JA Elbers, AH Goldstein, A Grelle, A Granier, J Guðmundsson, D Hollinger, AS Kowalski, G Katul, BE Law, Y Malhi, T Meyers, RK Monson, JW Munger, W Oechel, U Paw, T Kyaw, K Pilegaard, Ü Rannik, C Rebmann, A Suyker, R Valentini, K Wilson and S Wofsy. 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *J. Agricul. Meteorol.* 113: 53-74.
- Fang C and JB Moncrieff. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biol. Biochem.* 33:155-165.
- Hubbard RM, MG Ryan, K Elder and CC Rhoades. 2005. Seasonal patterns in soil surface CO₂ flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine forests. *Biogeochemistry* 73:93-107.
- IGBP. 1998. Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Science* 280:1393-1394.
- IPCC. 2001. Climate change 2001. A report of working group I of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute of Global Environmental strategies (IGES). Japan.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge.
- Kim G and C Kim. 1998. Research trends on forest biomass production in Korea. *Forest Bioenerg.* 8:94-107.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS). 2010. Agricultural area survey. www.kosis.kr.
- Lee NY. 2012. Estimation of carbon storage in three cool temperature broad-leaved deciduous forests at Jirisan National Park, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 30:121-127.
- McCarl BA and UA Schneider. 2001. Greenhouse gas mitigation in U.S agricultural and forest. *Science* 294:2481-2482.
- Rachhpal SJ, B Andrew, DN Michael, GG David and N Zoran. 2008. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand. *Glob. Chang. Biol.* 14:1305-1318.
- Raich JW and WH Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44:81-99.
- Rosenzweig C and D Hillel. 1998. Climate change and the global harvest. Oxford University Press. New York.
- Suh SU, YM Chun, NY Chae, J Kim, JH Lim, M Yokozawa, MS Lee and JS Lee. 2006. A chamber system with automatic opening and closing for continuously measuring soil respiration based on an open-flow dynamic method. *Ecol. Res.* 21:405-414.
- Suh S, S Park, K Shim, B Yang, E Choi, J Lee and T Kim. 2014. The effect of rain fall event on CO₂ emission in *Pinus koraiensis* plantation in Mt. Taehwa. *Korean J. Environ. Biol.* 32:389-394.
- Tami K, Y Kominami, T Miyama, Y Goto and Y Ohtani. 2008. Topographical effects on soil respiration in a deciduous forest-The case of weathered granite region in Southern Kyoto Prefecture. *J. Agricul. Meteorol.* 64:215-222.
- Waring RH and SW Running. 1998. Forest ecosystems: analysis at multiple scales. Academic Press.

Received: 1 September 2015

Revised: 7 September 2015

Revision accepted: 9 September 2015