

과수 재배지의 탄소 수지 평가 연구 동향

A Review on the Carbon Exchange Estimation in Fruit Orchard

최은정* · 서상욱 · 정현철 · 이종식 · 김건엽 · 소규호

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

Choi, Eun Jung[†], Suh, Sang Uk, Jeong, Hyun Cheol, Lee, Jong Sik,
Kim, Gun Yeob and So, Kyu Ho

Climate Change & Agroecology Division, National Academy of
Agricultural Science, Wanju-gun, Korea

ABSTRACT

Agro-ecosystem plays an important role in the mitigation of atmospheric CO₂ concentration through photosynthesis and soil carbon fixation. The perennial crops have capacity of carbon accumulation because they have lived for years in the same position. Carbon dioxide fixation occurs in the fruit orchard by photosynthesis and soil carbon sequestration. The objectives of this review are to introduce the fruit orchard as a carbon dioxide sink and to summarize the methods that measure CO₂ flux in the orchard. There are three difference methods (chamber, biomass, and eddy covariance method) to measure CO₂ exchanges on sites. However, there is no standard method suitable for fruit cultivation condition in Korea. Thus the standard method have to be developed in order to exactly estimate the carbon accumulation. In foreign studies, the carbon assessments were conducted in apple, peach, olive, grape orchard and so on. On the other hand the estimation of CO₂ exchange was carried out for apple and mandarine orchard in Korea. According to these results, fruit orchard is a CO₂ sink even though amount of carbon accumulation is smaller than the forest. To introduce certainly fruit orchard as greenhouse gas sink, long-term monitoring and further study have to be conducted under each planting condition.

Key words : Fruit, Orchard, Carbon Dioxide Sink, Carbon Exchange

1. 서론

최근 태풍과 지진, 해일 등 전 지구적인 기후변화에 대해 모두가 관심을 갖는 가운데 기후변화의 원인인 지구 온난화 문제가 이슈가 되고 있다. 온난화를 야기시키는 온실가스를 줄이기 위해 현재

많은 연구자들이 감축기술 개발 및 탄소 저감 방안 마련 등 수많은 노력을 하고 있다(Patrick *et al.*, 2005; Pete *et al.*, 2008; Christopher *et al.*, 2012).

지난 수십 년간의 연구를 통해 육상 생태계가 대기 중 이산화탄소 농도 증가를 감소시킨다는 것은 잘 알려져 있다(Scurlock *et al.*, 1998; Sabine *et al.*,

[†] Corresponding author : E-mail: choiej1@korea.kr

2004; Josep *et al.*, 2007). 육상 생태계 중 산림생태계는 광합성과 호흡을 통해 이산화탄소 흡수·배출을 조절하고(Yude *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2013), 농업 생태계는 경지 관리 방법, 작물 종류, 유기물 관리 방법에 따라 토양에 탄소를 격리하여 탄소 흡수원으로서의 역할을 하고 있다(G. Philip *et al.*, 2000). 농업에서는 이러한 토양 탄소 저장뿐만 아니라, 작물 재배를 통해서도 이산화탄소 농도를 줄이는 데 기여한다.

우리나라 농경지의 약 60%를 차지하고 있는 벼는 일년생 작물로 작기 중 이산화탄소를 흡수하고(Moon *et al.*, 2003), 주요 식량작물인 밀도 작기 중 대기의 탄소농도를 저감시킨다는 연구가 발표되었다(Wang *et al.*, 2013). 그러나 일년생 작물의 특성상 매년 수확, 고사하기 때문에 바이오매스(biomass)에 대한 장기 탄소 저장현상이 발생하지 않아 탄소 흡수원으로서의 역할은 미미하다고 할 수 있다.

과수, 차, 고무 등과 같은 영년생 작물은 짧게는 수년에서 길게는 수십 년간 한 곳에서 재배되므로 토양과 식물체에 탄소 축적이 가능하다. 특히 과수의 경우, 가지치기 및 수종 갱신에 따른 바이오매스 손실을 제외하면 정기적인 벌목 및 이식에 영향을 받지 않기 때문에(Korea Statistical Information Service, 2014) 다른 영년생 작물보다 대기 중 이산화탄소 농도를 저감하는 능력이 더 클 것으로 생각된다.

우리나라는 국토 면적이 작지만, 여러 가지 과수를 재배할 수 있는 기후 및 토양 조건을 가지고 있어 예로부터 과수 재배가 이뤄지고 있다. 현재는 각지에 과수 연구소가 설립되어 지역에 맞는 품종과 기술개발로 고품질 과수를 대량 생산하기 위해 노력하고 있다. 또한, 국제적 수요에 따라 과수의 수출이 이뤄지고, 가공 원료로도 사용 가능하여 과수 재배는 꾸준할 것으로 예상된다. 이러한 이유로 탄소 흡수원으로서 과수 재배지의 역할이 증명된다면 그 가치가 클 것으로 예상된다.

산림의 탄소 저장량에 대한 연구는 활발히 진행(Park *et al.*, 2013; Jeong *et al.*, 2013; Yude *et al.*, 2011; Toshiyuki *et al.*, 2007)되고 있는 반면 과수에

대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 여러 자원의 투입으로 생태계를 조절하는 농업의 특성상 탄소 변화량에 관련 있는 많은 인위적 요인들을 탄소 평가에 고려해야 하는 것이 산림과 다르게 연구가 어려운 이유 중 하나이다(Luca *et al.*, 2008). 또한 지역적, 기후적, 식생적 특성을 고려한 평가방법의 부재도 과수의 탄소 수지 평가 연구를 더디게 만들었다. 따라서 본 연구는 과수 재배지의 탄소 수지 평가 연구에 대한 국내의 현황을 파악하여, 과수 재배지의 탄소 흡수원으로서의 가치를 고찰하기 위해 수행되었다. 이러한 연구결과는 향후 국가 온실가스 감축 기술 개발을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 과수 재배지의 탄소 수지 평가 방법

2.1 챔버(Chamber)법

챔버를 이용한 방법은 주로 토양 호흡을 측정할 때 사용된다(Lee *et al.*, 2013). 과수 재배지에는 과수뿐만 아니라 낙엽과 전정가지의 토양 축적, 토양 유기물 분해, 지하부 뿌리 호흡 등 과수 재배지 내 탄소 순환과 관련 있는 요소가 많이 존재하기 때문에 전체적인 탄소 수지를 평가하기 위해서는 토양 호흡량을 함께 측정해야 한다.

과수 재배지를 포함한 육상 생태계에서 순 일차생산량(Net Primary Production: NPP)은 식물이 이산화탄소를 흡수하여 광합성을 통해 생산한 총 일차생산량(Gross Primary Production: GPP)에서 식물체 자가 호흡량(Autotrophic Respiration: AR)을 뺀 나머지로 계산된다. 즉, NPP는 생산자가 한 해 동안 생산한 순 탄소 고정량이다. 그러나 NPP는 낙엽과 낙지, 잔사 등 유기물의 분해, 토양 미생물 호흡까지도 포함하고 있으므로 이러한 타가 호흡량(Heterotrophic Respiration, HR)을 제외한 값이 생태계 탄소 수지를 정확하게 평가하는 순 생태계 생산량(Net Ecosystem Production, NEP)이 되며, 이를 토대로 탄소 흡수원과 배출원을 평가할 수 있다. 따라서 토양 호흡량은 과수 재배지의 탄소 수지를 평가하기 위한 중요 요소 중 하나이다.

$$\text{NPP} = \text{GPP} - \text{AR} \quad (1)$$

$$\text{NEP} = \text{NPP} - \text{HR} \quad (2)$$

보통 챔버법은 측정하고자 하는 면을 지면으로 하여 밀폐 공간을 만들고, 토양에서 확산 방출되는 이산화탄소를 시간의 경과에 따라 포집하는 방법을 말한다(Lee *et al.*, 2013). 포집된 가스를 가스크로마토그래피(Gas chromatography)나 간단화 된 이산화탄소 분석기를 사용하여 농도를 측정하고, 단위 시간당 단위 면적당의 토양 호흡량을 계산한다. 근래에는 적외선기체분석기를 챔버에 직접 연결하여 이산화탄소 농도를 실시간으로 측정하는 방법이 많이 이용되고 있다(Eric *et al.*, 2000; Davidson *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2010).

그러나 챔버 구조상 밀폐된 공간의 이산화탄소 농도가 상승하면서 토양으로부터 가스 확산이 저하되어 토양 호흡량이 과소 평가될 우려가 있기 때문에(Bekku *et al.*, 1995) 측정시간을 잘 고려하여 사용하여야 한다. 또한, 토양 생태계를 구성하는 유기물, 작물 지하부, 미소 곤충, 미생물 등 구성 요소의 호흡량을 측정하기 위해서는 발생 원인별로 특성에 맞는 연구 방법을 사용하여야 할 것이다(Lee *et al.*, 2010).

2.2 바이오매스(Biomass) 측정법

바이오매스 측정법은 나무를 직접 벌채하여 탄소 흡수량을 추정하는 방법으로, 산림의 탄소 축적량을 조사하는데 이용되는 방법이다(Lee, 2010). 현지에서 표준목을 벌목하여 줄기, 가지, 잎, 뿌리 등 부위별로 구분하여 각각의 생중량을 측정한 후 85 °C에서 건조하여 건중량을 측정한다(Park *et al.*, 2007). 이를 토대로 연평균 전체 바이오매스 증가량을 계산하고, 건물질 탄소 분율인 0.5를 곱하여 탄소 축적 증가량을 산출한다(Korea Statistical Information Service, 2014).

과수의 경우, 매년 잎이 떨어지고 새로 나기 때문에 정확한 바이오매스 측정을 위해서는 낙엽 및 낙지에 대한 조사와 전정되는 가지도 조사항목에 포함되어야 한다. 그러나 고사에 의한 고사목의 경우,

생산성을 위해 단기간 내 벌목되며 병해충 예방을 위하여 과수 재배지에서 제거하는 것이 일반적이기 때문에 바이오매스 측정에서 제외되는 것이 타당할 것으로 생각된다. 또한, 산림과 달리 과수는 과수별로 재배형태, 나무줄기 모양, 나무 형태가 다르기 때문에 정확한 탄소 흡수량을 추정하기 위해서는 과수별 특성에 맞는 채취 방법이 마련되어야 할 것이다.

바이오매스 측정법은 탄소 흡수량의 실질적인 값을 얻을 수는 있으나, 농가 소득과 연계되는 과수를 벌채해야 한다는 단점을 가지고 있다. 또한, 같은 과수라도 재배 환경, 재배 품종, 수중에 따라 탄소 흡수량에 차이가 있기 때문에 이를 고려하여 측정해야 할 것이다.

2.3 에디 공분산(Eddy Covariance)을 이용한 플럭스 측정

육상생태계와 대기 사이의 물질 흐름을 플럭스(flux)라고 하는데, 플럭스를 측정하기 위해서는 주로 미기상학적인 방법을 이용한다. 미기상학 방법 중 에디 공분산 방법은 지면과 대기 사이에 교환되는 에너지 및 다양한 물질(수증기, 이산화탄소, 메탄 등)을 정량화하는 대표적인 방법이다(Hong *et al.*, 2009).

산림은 물론 과수 재배지와 일년생 작물의 탄소 수지를 평가하는데도 이 방법이 이용되고 있다(Toshiyuki *et al.*, 2007; Andrew E. *et al.*, 2001; Wang K. *et al.*, 2013). 대기와 생태계 사이에서 일어나는 연간 이산화탄소 변화를 순 생태계 교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)이라 하며 음의 NEE값은 이산화탄소 흡수를, 양의 NEE값은 배출을 나타낸다(Toshiyuki *et al.*, 2007). 플럭스 측정은 대상지 내 모든 생물의 배출과 흡수를 관측하여 측정지역 생태계의 탄소 수지를 평가할 수 있다.

에디 공분산을 이용한 플럭스 측정방법은 측정 지역의 훼손 없이 자료를 연속적으로 수집할 수 있다는 큰 장점이 있으나 한계점도 가지고 있다. 먼저, 플럭스를 측정하기 위한 타워 설치 장소의 요건이 까다로운 점이다. 타워를 설치하기 위해서는



Fig. 1. The figure of flux tower in fruit orchard.

대기가 안정하고 지면이 균일해야 하는데 우리나라 과수 재배지의 경우, 산을 개간하여 사용하는 경우가 많고 재배지 주변에 탄소 플럭스 측정에 영향을 주는 요인(건물, 도로, 저수지 등)들이 있어 관측지 선정에 어려움이 있다. 두 번째로는 연구를 수행하기 위해서는 고가의 장비를 사용해야 한다는 점이다. 앞서 말한 챔버법과 바이오메스 측정법과는 달리 측정 장비 구입으로 인한 경제적인 부담을 줄 수 있다. 마지막으로 관측된 결과를 분석하는 전문가의 부족도 한계점이라 하겠다. 플럭스 자료 처리 과정 중 결측자료메우기(Gap Filling)는 측정값을 과대 평가하거나 과소 평가할 수 있기 때문에 측정지의 조건을 명확히 파악하고 미기상학 자료를 참고하여 분석할 수 있는 전문가가 필요하나, 현재 국내 농업분야에서 이러한 전문가가 부족한 현실도 에디 공분산법을 이용하는데 큰 어려움으로 작용한다.

3. 국내외 과수 재배지 탄소 수지 연구 동향

3.1 국외 연구 동향

단년생 작물의 경우, 유기물의 무기화가 빠르게 진행되어 대기 중 탄소 배출이 많기 때문에 이산화탄소 고정 능력이 영년생 작물보다 떨어진다는 연구 결과가 발표되었다(Robertson *et al.*, 2000; Janssens *et al.*, 2003). 이를 토대로 영년생 작물의 탄소 저장능력에 대한 관심이 증가하면서 각국의 조건과 환경에 따라 과수를 포함한 영년생 작물에 대한 연구가 진행되고 있다(Whiley, 1990; Maria *et al.*, 1994; Luca *et al.*, 2008).

과수 재배지의 탄소 고정 능력에 대해서는 사과, 올리브, 복숭아 재배지에서 수행되었고, 과수 나무에 대한 탄소 저장에 관해서는 살구, 자두, 복숭아, 포도, 레몬, 오렌지, 귤이 연구되었다. 사과 재배지에서 수행한 연구는 1994년 일조량에 따른 사과 과수원의 이산화탄소 농도 변화를 이동식 가스 분석기를 사용하여 측정하였다(Maria *et al.*, 1994). 이 연구 결과를 통하여 사과 과수원의 대기 중 평균 이산화탄소 농도보다 날씨가 맑은 날 이산화탄소 농도가 2 ppm 정도 낮은 것을 알 수 있었는데, 이는 사과 나뭇잎의 광합성 작용으로 인한 탄소 고정 때문에 이산화탄소 농도가 낮아짐을 나타낸다. 또, 지중해 연안에서 자라는 올리브와 복숭아의 식생 밀도에 따라 과수 생산량과 이산화탄소 고정량이 변한다는 연구(Adriano *et al.*, 2005)가 보고되었고, 관개수량이 올리브 재배지의 탄소 교환량에 영향을 미친다는 연구도 스페인에서 수행되었다(Luca *et al.*, 2008). 이러한 연구들은 과수에 대한 탄소 고정량을 평가할 뿐 아니라 토양 호흡을 통해 배출/흡수되는 이산화탄소 양도 측정함으로써 과수 재배지 전체에 대한 탄소 수지를 평가하는 접근을 시도하였다.

과수 나무와 과수에 대한 탄소 저장 능력은 나무를 지상부(줄기, 가지, 잎, 과수)와 지하부(뿌리)로 나누어 생체량을 측정함으로써 평가하였다(Micaela *et al.*, 2002). 각 부분을 건조한 후 무게를 측량하고, 나무 성장 년수로 나누어 총탄소량으로 환산한 결과, 레몬의 탄소 저장능력이 가장 뛰어난 것으로 나타났(Table 1). 이는 레몬 나무에서 과수의 탄소 함량이 높았기 때문에 나타난 결과이다.

Table 1. Annual CO₂ absorption amounts and assimilated carbon of various fruit trees in Muiccia, Spain

	Apricot	Plum	Peach	Grape	Lemon	Orange	Mandarine	Reference
	----- C (g m ⁻² year ⁻¹) -----							
Root	132.8	215	268.9	103	174.9	44.8	17.9	Micaela <i>et al.</i>
Branches	57.8	39.9	58.9	52.2	112.4	62.3	11.8	
Leaves	46.7	17.5	125.9	65.8	192.7	67.6	37.8	
Fruits	174.3	297.9	218.5	270.4	322.3	362	280.8	
Trunk	58.5	63	101.6	30	28.6	28.5	5	
Carbon total	470.1	633.3	773.8	521.4	831	565.2	353	

그러나 과수 나무의 특성상 과수를 인간이 섭취한다는 것을 감안했을 때 과수를 제외한 총탄소량은 복숭아가 가장 높은 것으로 나타났다.

위의 결과는 과수의 품종과 지역·기후 조건을 고려했을 때 달라질 수 있으며, 정확한 연간 성장량을 평가하기 위해서는 성장 년수별로 각 부위의 생체량을 측정하여야 할 것이다.

과수 재배지의 탄소 수지평가에 대한 국외 연구 동향을 살펴보면 연구 목적에 따라 측정방법 및 측정기간이 다를 수 있다. 또한, 장기적인 모니터링을 통한 탄소 흡수원으로서의 규명보다는 재배 및 기후 조건에 따른 이산화탄소 흐름을 비교 평가하는데 연구의 초점이 맞춰져 있었다. 이러한 연구들을 통해 지역, 과수 품종, 기후, 측정 방법 등에 따라 탄소 저장량에 차이가 있고 그 양 또한 미미하지만, 과수 재배지의 잠재적인 탄소 고정능력은 예상할 수 있었다. 이를 토대로 국내에서 적용 가능한 표준 방법을 만들기 위해서는 장기적인 관점으로 과수 종류, 기후, 토양 특성뿐 아니라, 재식 밀도, 관개수량과 같은 재배 기술을 고려하여 방법을 개발해야 한다고 생각한다.

3.2 국내 연구 동향

통계청 자료에 따르면 우리나라의 과수 재배 면적은 2010년 기준 시설재배를 제외한 노지재배면적이 약 156,000 헥타르로 칩엽수림과 활엽수림을 포함한 총 산림면적의 2.6%, 활엽수림의 9%에 해당된다(Korea Statistical Information Service 2014). 지

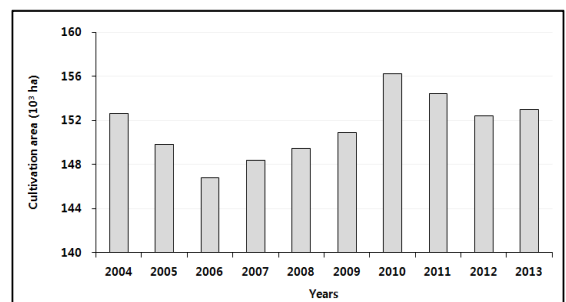


Fig. 2. The changes of cultivation area of fruits in Korea from 2003 to 2013 (Korea Statistical Information Service, 2014).

난 10년간 우리나라 과수 노지 재배 면적을 살펴보면 2006년을 기점으로 과수 재배 면적이 증가하여 2010년에 가장 높았고, 최근에는 변동폭이 작은 것을 볼 수 있다(Fig. 2). 생산량과 가격변동으로 인해 과수별 재배면적이 증감하기 때문에 전체적인 과수 재배면적의 변화가 작은 것으로 생각된다.

우리나라 과수별 재배 면적 분포를 보면 2013년을 기준으로 사과가 가장 많이 재배되고 있고 그 뒤로 감, 감귤이 뒤따르고 있다(Fig. 3)(Korea Statistical Information Service, 2014).

2013년 자료를 지역적으로 나누어 봤을 때 경상북도의 과수 재배면적이 약 53,000 헥타르로 가장 넓었으며, 이 중 사과 재배면적이 35%를 차지하는 것으로 볼 때 경상북도에서 사과 재배가 많이 이루어짐을 알 수 있었다(Fig. 4)(Korea Statistical Information Service, 2014).

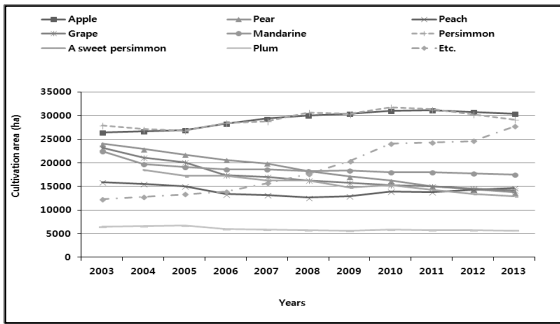


Fig. 3. The changes of cultivation area of various fruits in Korea from 2003 to 2013 (Korea Statistical Information Service, 2014).

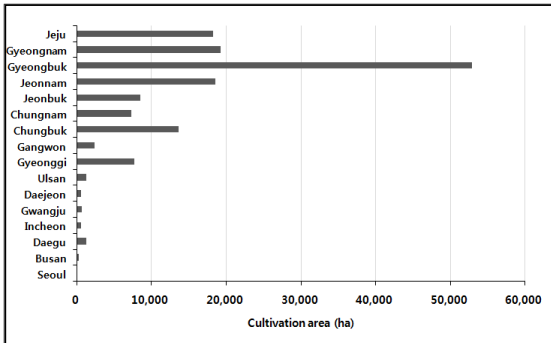


Fig. 4. The cultivation area of fruits with province in Korea (Korea Statistical Information Service, 2014).

국내에서 과수의 탄소 수지 평가에 대한 연구는 산림에 비해 미약한 실정이다. 과수재배지를 온실가스 흡수원으로 보는 인식이 부족하고, 평가 방법에 대한 명확한 규정이 없어 이를 연구하는데 어려움이 있기 때문이라 생각된다. 이러한 여건에도 불구하고 우리나라 대표 과수와 녹차 재배지에 대한 탄소 수지 평가 연구가 수행되었다.

우리나라에서 재배 면적이 가장 넓은 사과 재배지에서 토양 호흡량과 탄소 고정량을 측정한 연구들이 수행되었다(Kim et al., 2008; Lee et al., 2009; Seo et al., 2012). 이재만 등(2009)은 수원에 위치한 국립원예특작과학원내 과원에서 사과 '후지' 품종을 대상으로 토양 호흡량을 조사하였다. 챔버법으로 측정한 결과 헥타르당 연간 19.6톤의 이산화탄소가 방출된다는 결과를 얻었으며, 이는 국내 산림

보다 약 27~42% 정도 적고, 일년생 작물인 고추 재배지보다는 약 12% 정도 높은 수준이었다(Lee et al., 2009).

서영진 등(2012)이 경상북도농업기술원 과수 포장에서 수행한 연구 결과를 보면 바이오매스법으로 생체량을 측정한 결과 과수를 포함한 5년생 후지 품종에 대한 탄소 축적량이 주당 약 1.0 kg였다. 개발한 예측식을 가지고 경북지역의 재배면적을 대입하여 계산했을 때는 매년 40만 톤의 탄소 축적 효과가 있는 것으로 나타났다. 관수, 시비, 재식 밀도에 따라 축적량의 차이는 있겠지만, 이를 통하여 우리나라 후지 재배지가 탄소 흡수원이 될 수 있다는 가능성을 보았으며 측정 나무의 수령이 5년인 것을 감안했을 때 목질화가 많이 이루어진 높은 수령의 사과나무에서는 더 큰 축적량이 나타날 것으로 예상된다.

국내 과수부문 최초로 에디 공분산법을 이용하여 경북 의성군 사과 재배지의 탄소 수지가 평가되었다. 플릭스 타워를 설치하여 자료를 얻은 결과, 과수 재배지의 순 생태계교환량(NEE)이 3년 평균 5.2t C ha⁻¹yr⁻¹이었다(Kim et al., 2008). 이 결과는 과수를 포함한 재배지에서 헥타르당 연간 5.2톤의 탄소가 흡수되는 것을 나타낸다. 그리고 같은 지역에서 사과 재배지에 대한 순 생태계생산량(NEP)을 바이오매스법을 통하여 측정하였는데, 과실을 포함한 지상부와 지하부의 NEP값이 평균 4.4t C ha⁻¹yr⁻¹이었다(Seo et al., 2008). 그러나 앞에서도 언급하였듯이 인간이 섭취하는 과수 부분은 탄소 축적량에서 제외되는데, 이 부분을 제외하면 헥타르당 연간 약 0.3톤의 탄소가 사과 재배지에서 흡수됨을 알 수 있다. 두 측정값을 비교하였을 때 에디 공분산법에서 생기는 오차(0.5톤)를 감안하면 측정값의 차이는 거의 없는 것으로 판단된다. 사과 재배지의 탄소 흡수량은 2004년 대관령 신갈나무 숲에서 측정한 순 생태계생산량이 2.4t C ha⁻¹yr⁻¹인 것에 비해 1/8 정도 수준이지만(Kim et al., 2005), 이를 토대로 과수 재배지가 온실가스 감축에 영향을 미칠 것이라 판단된다.

2011년에 제주도에 위치한 감귤 재배지에서도

Table 2. Summary of carbon exchange measurement studies conducted at fruits orchard in Korea

Fruits	Site	Methods	Carbon fixation	Reference
Apple	Daegu	Biomass	1.0 kg plant ⁻¹	Seo <i>et al.</i> , 2012
	Uiseong	Eddy covariance	5.2t C ha ⁻¹ yr ⁻¹ (include fruits)	Kim <i>et al.</i> , 2008
		Biomass	4.4t C ha ⁻¹ yr ⁻¹ (include fruits)	Seo <i>et al.</i> , 2008
Mandarine	Jeju	Eddy covariance	4.2t C ha ⁻¹ yr ⁻¹ (include fruits)	Seo <i>et al.</i> , 2012
Tea	Jeju	Biomass	4,343.6t CO ₂ yr ⁻¹	Oh <i>et al.</i> , 2010

탄소 흡수량이 평가되었는데 에디 공분산법을 이용하여 순 생태계교환량을 측정한 결과, 헥타르당 연간 약 4.2톤의 탄소가 흡수되는 것을 알 수 있었다 (Seo *et al.*, 2012).

과수는 아니지만 영년생 작물인 차나무 재배지에서도 이산화탄소 축적량의 변화를 바이오매스법을 통하여 측정하였다. 연령에 따라 지상부와 지하부를 채취하고 생중량을 측정하여 연령별 현중량의 변화를 나타내는 회귀식을 구한 뒤, 이를 토대로 전체 재배지의 이산화탄소 축적량을 계산한 결과 연간 4,343.6 톤의 이산화탄소가 고정되는 것으로 추정되었다(Oh *et al.*, 2010).

우리나라는 과수 재배지의 탄소 수지평가에 대한 연구를 시작하지 얼마 되지 않아 국외 연구들과 비교하였을 때 연구 데이터의 양이 적지만 현재까지의 연구들을 살펴보면 여러 가지 방법으로 탄소 수지를 측정하려고 시도하였으며, 이를 바탕으로 과수 재배지가 탄소 흡수원으로서의 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

그러나 과수 재배지의 과목들이 온실가스 배출량을 줄이는데 기여한다는 것을 증명하기 위해서는 탄소 수지를 측정할 수 있는 명확한 방법과 조건이 제시되어야 할 것이며, 이를 마련하기 위한 많은 연구 결과가 도출되어야 할 것이다. 특히 농업은 기후와 토양 같은 환경뿐만 아니라, 재배자의 재배 기술과 방법에 따라 생산량과 온실가스 배출량에 영향을 받으므로 이를 분류하는 기준 또한 필요할 것으로 생각된다. 또한, 우리나라는 지역에 따라 토

성, 온도, 강수량 등의 차이가 있으므로 이러한 차이도 측정할 때 고려되어야 할 것이다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 과수 재배지의 탄소 수지 측정 방법 및 국내외 연구 동향을 조사함으로써 과수 재배지의 탄소 흡수원으로서의 가치에 대해 평가해 보았다. 과수를 포함한 영년생 작물에 대한 탄소 축적 능력에 대해서는 2006 IPCC 가이드라인에도 언급되어 있지만, 이를 측정하기 위한 방법과 기준이 아직 모호한 실정이다. 과수는 한 곳에서 오랫동안 자란다는 점에서는 산림과 비슷하지만 과실 생산량 증대를 위해 전정 및 시비 관리, 수분 관리를 해야 하며, 이는 이산화탄소 배출 및 흡수에 영향을 주기 때문에 이러한 특성을 모두 고려한 측정 방법이 필요하다. 이에 대한 방안을 모색하기 위해 국내외 연구를 바탕으로 과수 재배지의 탄소 수지 평가 방법을 정리하고 비교하였다. 토양 호흡측정을 위한 챔버법, 가지, 잎, 줄기 등 과목의 수체를 직접 측정하는 바이오매스법, 미기상학적 요인을 이용하여 전체 생태계의 탄소 흐름을 측정하는 에디 공분산법이 그것이다.

각 측정방법 모두 장단점을 가지고 있어 방법별로 생기는 오차를 최소화하기 위해서는 두 개 이상의 방법을 병행해야 한다고 생각한다. 태풍, 장마, 폭설 등의 기상적 요인과 농자재 투입등의 인위적 요인은 대기와 토양 지표면의 탄소 농도를 측정하

는 챔버법과 에디 공분산법 결과에 영향을 미친다. 그리고 과수를 벌채하여 직접 측정하는 바이오매스법은 나무의 탄소 흡수량을 정량할 수 있지만, 과수 재배지의 생태계 탄소 흐름은 측정할 수 없다. 따라서 과수 재배지의 정확한 탄소 흡수량을 평가하기 위해서는 과수 생체량을 직접 측정하는 바이오매스법을 바탕으로 챔버법과 에디 공분산법을 같이 이용해야 할 것이다. 특히 국내 여건을 고려한 과수의 탄소 수지 연구가 아직 미흡하여 이에 대한 직접 측정방법론 정립이 시급히 시행되어야 한다. 국내외 연구 결과와 산림의 탄소 측정방법들은 과수 재배지의 보다 효율적인 탄소 수지 평가방법 마련에 기초 자료로 사용될 것으로 사료된다.

각 나라의 주요 과수를 대상으로 한 국외 연구들은 과수 재배지가 탄소 흡수원임을 밝히고 있다. 이러한 연구들은 과수 자체의 광합성을 통한 탄소 흡수뿐만 아니라, 과수 재배지의 토양 고정 능력에 대해서도 언급하고 있다(Adriano *et al.*, 2005). 경운, 유기물 투입 등과 같은 토양 관리를 통해서 토양의 탄소 고정량을 증대시킨다면 과수 재배지의 탄소 흡수량은 더욱 커질 것으로 기대된다.

국내 과수 재배지에 대한 탄소 수지 평가는 사과, 귤에 대해서 수행되었으며, 사과의 경우는 같은 지역에서 다른 방법으로 평가되었다. 경북 의성에 위치한 '후지' 사과 재배지에서 측정한 순 생태계 교환량과 순 생태계생산량은 각각 $5.2t\ C\ ha^{-1}yr^{-1}$ (과실 포함), $4.4t\ C\ ha^{-1}yr^{-1}$ (과실 포함)이었으며, 제주도 감귤원에서 측정한 순 생태계교환량은 $4.2t\ C\ ha^{-1}yr^{-1}$ 이었다. 세 연구 모두 과수 재배지에서 이산화탄소가 흡수된다는 결과값을 나타내었으나, 토양 및 기후조건, 재배기술에 따라 대기 중 이산화탄소 농도가 달라지기 때문에 좀 더 다양한 조건에서의 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다. 그리고 같은 과수라도 재배 지역과 품종, 수령에 따라 탄소 축적량이 달라지므로 재배 지역과 품종을 분류하여 관측값을 비교·분석하는 연구도 수행되어야 할 것이다.

인위적인 요인 투입과 과수 부분의 제외로 인해 과수 재배지의 탄소 흡수량은 산림에 비해 그 양이

미미하나, 탄소 흡수원으로서 역할을 한다는 것을 많은 연구들을 통하여 알 수 있었다. 따라서 국내 현실에 맞는 측정 방법이 정립된다면 과수 재배지에 대한 연구가 더욱 활발해질 것이며, 이는 온실가스 감축 목표 달성에 기여를 할 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(PJ01003602)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Andrew E, Surker, Shashi B, Verma. 2001. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biology* 7:279-289.
- Andriano S, Vitale N, Assunta MP, Cristos X, Giuseppe C, Paul Z, Bartolomeo D. 2005. Net CO₂ storage in mediterranean olive and peach orchards. *Scientia Horticulturae* 107:17-24.
- Bekku Y, Koizumi H, Nakadai T, Iwaki H. 1995. Measurement of soil respiration using closed chamber method: an IRGA technique. *Ecological Research* 10:369-373.
- Christopher F, Nathalie F, Anil HS, 2012. Peatland geo-engineering: an alternative approach to terrestrial carbon sequestration. *Philosophical Transactions of The Royal Society* 370:4404-4421.
- Davidson EA, Savage K, Verchot LV, Navarro R. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 113:21-37.
- Eric AD, Louis VV, Henrique JC, Ilse LA, Carvalho JEM. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48:53-69.
- G. Philip R, Eldor AP, Richard RH. 2000. Green-

- house gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289:1922.
- Hong JK, Kwon HJ, Lim JH, Byun YH, Lee JH, Kim J. 2009. Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing (in Korean with English abstract). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11:19-26.
- Janssens IA, Freibauer A, Ciais P, Smith P, Nabuurs GJ, Folberth G, Schalamadinger B, Hutjes RWA, Ceulemans R, Schulze ED, Valentini R, Dolman H. 2003. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science* 300:1538-1542.
- Jeong HY, Lee WK, Nam KJ, Kim MI. 2013. Estimation the change of potential forest distribution and carbon stock by climate changes-Focused on forest in Yongin-city (in Korean with English abstract). *Climate Change Research* 2:177-188.
- Josep GC, Diane EP, Roger G, Richard AH, Yiqi L, Michael RR, Pete S, Will S. 2007. Saturation of the terrestrial carbon sink. *Terrestrial Ecosystems in Changing World Global Change*. pp 59-78.
- Kim HH, Shim KM, Kim GY. 2008. Study on carbon sink agricultural sector regarding to UNFCCC (in Korean with English abstract). *The Research Report of National Institute of Horticultural & Herbal Science*, pp 53-94.
- Kim SD, Kim WS, Liang N, Inoue G. 2005. CO₂ sink assessments for long-term monitoring in a cool-temperate deciduous forest in Korea. *Asia-flux Workshop Proceeding*, pp 27.
- Kim SY, Park HJ, Hong YD, Han JS, Son JS, Park JH. 2013. Study on the estimation between CO₂ flux in tree and atmosphere (in Korean with English abstract). *Climate Change Research* 4:305-316.
- Korea Statistical Information Service. 2014. www.kosis.kr
- Lee EH, Lim JH, Lee JS. 2010. A review on soil respiration measurement and its application in Korea (in Korean with English abstract). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12:264-276.
- Lee JH, Yi JS, Chun YM, Chae NY, Lee JS. 2013. Discussion of soil respiration for understanding ecosystem carbon cycle in Korea (in Korean with English abstract). *Korean Society of Limnology* 46:310-318.
- Lee JM, Kim SH, Park HS, Seo HH, Yun SK. 2009. Estimation of soil CO₂ efflux from an apple orchard (in Korean with English abstract). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11:52-60.
- Lee MS, Kaneyuki N, Takayuki N, Hiroshi K. 2003. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and Soil* 255:311-318.
- Lee NY. 2010. Carbon cycle in terrestrial ecosystems-Net Ecosystem Production(NEP) in a forest (in Korean with English abstract). *Journal of National Park Research* 1:163-168.
- Luca T, Francisco O, Francisco V. 2008. Carbon exchange and water use efficiency of a growing, irrigated olive orchard. *Environmental and Experimental Botany* 63:168-177.
- Maria H, Michael MB, Fritz L. 1994. Diurnal CO₂ fluctuations in an apple orchard. *Environmental and Experimental Botany* 34:385-391.
- Micaela C, Cesar M, Carlos AL, Maria MC, Martinez B. Investigation into CO₂ absorption of the most representative agricultural crops of the region of Murcia. www.lessco2.es
- Moon BK, Hong JK, Lee BR, Yun JI, park EW, Kim J. 2003. CO₂ and energy exchange in a rice paddy for the growing season of 2002 in Hari, Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 5:51-60.
- Oh SJ, Cheon SM, Lee JG, Ko KS, Ko SC. 2010.

- Change in CO₂ stock of *Camellia sinensis* L. and estimation of green tea site as CO₂ sink. Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference 19:175.
- Park CW, Lee JY, Yi MJ, Kim CS, Park GS, Kim RH, Lee KH, Son YH. 2013. Estimation of change in soil carbon stock of *Pinus densiflora* forests in Korea using KFSC model under RCP 8.5 climate change scenario (in Korean with English abstract). *Climate Change Research* 2:77-93.
- Park IH, Son YM, Son YH, Lee YJ, Lee SW, Kim RH, Lee KH. 2007. Survey Manual for Forest Biomass and Soil Carbon. Korea Forest Research Institute, pp 3-30.
- Patrick KM, Cadisch G, Albrecht A, Palm CA, Verchot L. 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71:43-54.
- Pete S, Daniel M, Zucong C, Daniel G, Henry J, Pushpam K, Bruce M, Stephen O, Frank O, Charles R, Bob S, Oleg S, Mark H, Tim M, Genxing P, Vladimir R, Uwe S, Sirintornthep T, Martin W, Jo S. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of The Royal Society Biological Sciences* 363:789-813.
- Robertson GP, Paul EA, Harwood RR. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture, contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289:1922-1925.
- Sabine CL, Heimann M, Artaxo P, Bakker DCE, Chen CTA, Field CB, Gruber N, LE Quéré C, Prinn RG, Richey JE, Lankao PR, Sathaye JA, Valentini R. 2004. Current status and past trends of the global carbon cycle. In: Field CB and Raupach MR (eds). *The Global Carbon Cycle*. Island Press, Washington DC, pp 17-44.
- Scurlock JMO, Hall DO. 1998. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology* 4:229-233.
- Seo HH, Kim JG, Park MY. 2008. Study on carbon sink agricultural sector regarding to UNFCCC (in Korean with English abstract). The Research report of National Institute of Horticultural & Herbal Science. pp 121-138.
- Seo HH, Moon KH, Son IC, Choa JH, Choe KS. 2012. Long-term measurement of carbon flux in agroforest ecosystem of mandarin orchard in Korea. *Korean Society for Horticultural Science Technology* 30:199.
- Seo YJ, Park JH, Cho DH, Choe SY. 2012. Study on carbon sink inventory in the apple production system (in Korean with English abstract). The Research Report of Gyongsangbuk-do Agricultural Research & Extension Service. pp 25-30.
- Statistics Korea. 2014. The study of improvement plan for carbon stock estimation in crop land.
- Toshiyuki O, Wenhong M, Takami S, Motoko I, Hiroshi K. 2007. Biometric based carbon flux measurements and net ecosystem production (NEP) in a temperate deciduous broad-leaved forest beneath a flux tower. *Ecosystems* 10:324-334.
- Wang K, Liu C, Zheng X, Pihlatie M, Li B, Haapanala S, Vesala T, Liu H, Wang Y, Liu G, Hu F. 2013. Comparison between eddy covariance and automatic chamber techniques for measuring net ecosystem exchange of carbon dioxide in cotton and wheat fields. *Biogeosciences Discuss* 10:8467-8503.
- Whiley AW. 1990. CO₂ assimilation of developing fruiting shoots of cv Hass avocado (*Persea americana* Mill). *South African Avocado Grower's Association Yearbook* 13:28-30.
- Yude P, Richard A, Birdsey, Jingyun F, Richard H, Pekka EK, Werner AK, Oliver LP, Anatoly S, Simon LL, Josep GC, Philippe C, Robert BJ, Stephen WP, A. David M, Shilong P, Aapo R, Stephen S, Daniel H. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333:988.