

생산형 녹지 중 사과나무 과수원의 탄소흡수 및 배출[†]

조현길* · 박성민** · 김진영*** · 박혜미***

*강원대학교 조경학과 · **강원대학교 원예학과 · ***강원대학교 대학원 조경학과

Carbon Uptake and Emissions of Apple Orchards as a Production-type Greenspace

Jo, Hyun-Kil* · Park, Sung-Min** · Kim, Jin-Young*** · Park, Hye-Mi***

*Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University

**Dept. of Horticultural Science, Kangwon National University

***Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kangwon National University

ABSTRACT

This study quantified the storage and annual uptake of carbon by apple trees in orchards as a production-type greenspace, and computed the annual carbon emissions from apple cultivation. Tree individuals in the study orchards were sampled to include the range of stem diameter sizes. The study measured biomass for each part including the roots of sample trees through a direct harvesting method to compute total carbon storage per tree. Annual carbon uptake per tree was quantified by analyzing the radial growth rates of stem samples at ground level. Annual carbon emissions from management practices such as pruning, mowing, irrigation, fertilization, and use of pesticides and fungicides were estimated based on maintenance data, interviews with managers, and actual measurements. Regression models were developed using stem diameter at ground level (D) as an independent variable to easily estimate storage and annual uptake of the carbon. Storage and annual uptake of carbon per tree increased as D sizes got larger. Apple trees with D sizes of 10 and 15 cm stored 9.1 and 21.0 kg of carbon and annually sequestered 1.0 and 1.6 kg, respectively. Storage and annual uptake of carbon per unit area in study orchards were 3.81 t/ha and 0.42 t/ha/yr, respectively, and annual carbon emissions were 1.30 t/ha/yr. Thus, the carbon emissions were about 3 times greater than the annual carbon uptake. The study identified management practices to reduce the carbon footprint of production-type greenspace, including efficient uses of water, pesticides, fungicides, and fertilizers. It breaks new ground by including measured biomass of roots and a detailed inventory of carbon emissions.

Key Words: Direct Harvesting, Carbon Storage, Low Carbon, Management, Regression Model

국문초록

본 연구는 생산형 녹지로서의 과수원을 대상으로 사과나무에 의한 탄소의 저장 및 연간 흡수를 산정하고, 재배 과정에

[†]: 이 논문은 2013년 농림축산검역본부에서 시행한 농산물 수출검역촉진사업의 연구결과이며, 2013년 한국환경생태학회 학술대회의 발표논문(Jo *et al.*, 2013b)을 발전시킨 것임.

Corresponding author: Hyun-Kil Jo, Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea, Tel.: +82-33-250-8345, E-mail: jhk@kangwon.ac.kr

서 관리에 기인하여 발생하는 연간 탄소배출량을 파악하여 탄소저감 효과를 계량화하였다. 연구대상 과수원에서 유목에서 성목에 이르는 일정 간격의 근원직경 크기를 고려한 수목을 구입하여, 근굴취를 포함하는 직접수확법에 의해 개체당 부위별 및 전체 생체량을 산정하고 탄소저장량을 산출하였다. 근원부의 줄기 원관을 채취하여 직경생장을 분석하고 연간 탄소흡수량을 산정하였다. 관리에 따른 연간 탄소배출은 전정, 제초, 관수, 시비, 병충해 방제 등을 포함하는 관리자료의 구득, 관리자 면담 및 부분 실측을 바탕으로 계량화하였다. 근원직경을 독립변수로 생장에 따른 사과나무 단목의 탄소저장과 연간 탄소흡수를 계량화하는 활용 용이한 계량모델을 개발하였다. 사과나무의 탄소저장과 연간 탄소흡수량은 모두 직경생장과 더불어 증가하였고, 직경급 간 그 차이도 직경이 커질수록 증가하는 경향이였다. 근원직경 10 및 15cm인 사과나무 단목은 각각 9.1 및 21.0kg의 탄소를 저장하고, 연간 1.0 및 1.6kg의 탄소를 흡수하는 것으로 나타났다. 연구대상 과수원의 단위면적당 탄소저장과 연간 탄소흡수량은 각각 3.81t/ha, 0.42t/ha/년이었으며, 연간 탄소배출량은 1.30t/ha/년이었다. 즉, 관리 관련 연간 탄소배출량은 연간 탄소흡수량보다 약 3배 더 많았다. 연구결과를 토대로, 생산형 녹지에 적용 가능한 관수, 농약 및 비료의 효율적 적용을 포함하는 저탄소형 관리방안을 모색하였다. 본 연구는 아직 부진했던 뿌리 생체량의 실측과 탄소배출의 구체적 인벤토리를 통해 탄소계량 관련 정보를 구축하는 새로운 초석을 제공한다.

주제어: 직접수확, 탄소저장, 저탄소, 관리, 계량모델

I. 서론

온실가스 및 기후변화는 현재 가장 심각한 세계 환경관심사 중의 하나이다. 기후변화와 관련된 온실가스 배출감축 노력은 전 세계적으로 다양한 노력이 이루어지고 있으며, 국내 역시 2020년 국가 온실가스 배출을 배출전망치(business as usual: BAU) 대비 30% 감축하겠다는 목표를 설정한 바 있다(www.greengrowth.go.kr). 대기 탄소농도 증가와 기후변화의 심각성은 그 영향을 지연 혹은 완화하는 탄소흡수원으로서 수목의 역할에 대한 관심을 고조시키고 있다. 국내외에서는 주로 산림수목(Birdsey, 1992; Milne and Brown, 1997; Song *et al.*, 1997; Jo and Ahn, 2000; Korea Forest Research Institute, 2010a) 및 도시수목(Nowak, 1994; Jo and Cho, 1998; McPherson, 1998; Jo, 1999a; McPherson and Simpson, 2000; Jo and Ahn, 2001; Jo, 2002; Nowak and Crane, 2002; Korea Forest Research Institute, 2010b; Park and Kang, 2010; Jo and Ahn, 2012; Jo *et al.*, 2013a)의 탄소흡수에 초점을 맞추어 연구가 진행되어 왔으며, 과수원을 포함하는 농업적 생산기능의 녹지유형과 연관된 연구는 상당히 미진한 상황이다. 과수 관련 소수의 국내연구(Rural Development Administration, 2008; Lee *et al.*, 2013)가 존재하지만, 유사 수령의 소수 개체에 국한된 결과로서 그 응용이 곤란하며, 유목에서 성목에 이르는 다양한 크기를 반영하여 생장에 따른 탄소흡수를 계량화한 과학적 연구는 부재한다.

도시 및 지역 스케일의 탄소저감 계량화는 토지이용 또는 녹지유형별로 타당한 관련 원단위의 적용을 요구한다. 생산형 녹지 중 과수원은 조경수목의 식재효과와 같이 수목에 의한 탄소흡수의 잠재력을 보유한다. 그러나, 생산을 목적으로 재배하는 과수원의 식재수목은 집약적 관리에 기인하여 일반 조경수목

의 탄소저감 효과와 상이할 수 있다. 즉, 과수재배는 해마다 전정, 제초, 시비, 관수, 병충해 방제 등 관리를 필요로 하며 직접 또는 간접적으로 대기에 탄소를 배출한다. 관리행위로부터의 탄소배출은 수목에 의한 탄소흡수의 일부를 상쇄시키는 결과가 된다(Jo, 1999b). 최근, 농림축산식품부는 온실가스 배출을 감축한 농가에게 감축량에 상당하는 탄소배출권을 제공하는 농업탄소상쇄제도를 도입하였고, 생산과정에서 온실가스 배출을 감축한 농축산물을 대상으로 저탄소농축산물 인증제를 시행하고 있다(www.mafra.go.kr). 그러나, 과수관리에 따른 탄소배출과 관련된 연구는 국내외에 걸쳐 전무한 실정이다. 생산형 녹지의 탄소수지 연구는 농업부문의 온실가스 인벤토리와 저탄소 생산은 물론, 조경분야의 기후변화 대응형 녹지조성 및 관리를 위한 부진한 정보를 구축하는데 필요하다.

국내 과수원 면적은 2014년 기준 농경지 전체 면적의 약 9%인 15만ha이었고, 사과나무 과수원이 과수원 전체 면적의 약 20%인 3만ha로서 재배과수 종류 중 가장 많은 면적을 차지하였다(www.kostat.go.kr). 본 연구의 목적은 생산형 녹지로서의 과수원을 대상으로 직접수확법을 통해 대표적 과수인 사과나무의 개체당 탄소저장 및 탄소흡수량을 산정하는 계량모델을 개발하고, 재배과정에서 관리에 기인하여 발생하는 탄소배출량을 파악하여 탄소저감 효과를 계량화하는 것이다. 또한, 탄소흡수는 최대화하고 배출은 최소화할 수 있는 저탄소형 관리방안에 필요한 기반정보를 마련하는 것이다. 본 논문에서 탄소저장량은 수목이 성장하면서 여러 해에 걸쳐 축적한 총량을, 탄소흡수량은 수목이 한 해 동안 흡수한 양을 각각 의미한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 수목굴취 및 생체량 측정

1) 연구대상 과수원 및 굴취수목 선정

연구대상 과수원은 연구의 효율성을 고려하여 연구진이 거주하는 춘천시의 과수원을 답사하여 연구협조를 의뢰한 후, 그 중 연구를 수락한 2개소의 사과나무 과수원을 최종 선정하였다. 선정 과수원은 각각 춘천시 신북읍 천전리 및 동내면 고은리에 위치하였다. 과수원을 현장 답사하여 유목에서 성목에 이르는 일정 간격의 근원직경 크기를 고려하고, 해당 수종 고유의 수형을 유지하면서 수관 등이 정상적으로 성장한 15개체를 굴취수목으로 선정하였다. 과수원 경영주는 생산용 수목의 굴취에 비협조적이고 고가의 비용을 요구하였다. 굴취수목 개체수의 결정은 수목구입 관련 난이성 및 고비용과 표본수의 충분한 확보라는 대립적 양 측면을 가감 조정한 것으로서, 연구대상 과수원에 분포하는 다양한 크기의 근원직경 대부분을 포함하였다. 대상 과수원에서 재배하는 사과나무 품종은 홍로와 부사이었다.

2) 현장굴취 및 생중량 측정

선정한 연구대상 수목은 7월 중순 현장에서 굴취하여, 줄기, 가지, 잎, 열매, 뿌리 등으로 구분한 부위별 생중량을 실측하였다. 굴취 시 근원직경, 수관폭, 수고 등 각 개체의 크기를 측정하였다. 또한, 사과나무 성장공간의 토양을 채취하여 Korean Institute of Agricultural Science and Technology(2000)의 토양분석방법에 따라 성장기반의 물리화학적 특성을 분석하였다. 현장굴취 및 생중량 측정은 Korea Forest Research Institute(2007)의 바이오매스 조사·분석 표준방법을 부분적으로 참조해 수행하였으며, 그 구체적 방법은 Table 1과 같다.

Table 1. Methods of digging and fresh-weight measurement for tree specimens

Component	Method
Tree size	<ul style="list-style-type: none"> • Diameter was measured to 0.1 cm at ground level with a caliper. • Crown width was measured to 0.1 m in duplicate at 90° with a measuring tape. • Tree height was measured to 0.1 m with a measuring tape after digging.
Root	<ul style="list-style-type: none"> • Roots were dugged with a backhoe and all broken roots were collected. • They were separated from the stem at ground level with a sawing machine. • They were washed with a high-pressure jet and then weighed to 10 g.
Stem	<ul style="list-style-type: none"> • The stem was weighed to 10 g after cutting out all branches with a sawing machine.
Branch/leaf	<ul style="list-style-type: none"> • Branches were weighed to 10 g after separating all leaves from them by hand, and leaves were also weighed to 10 g.
Fruit	<ul style="list-style-type: none"> • Fruits were weighed to 10 g after separating them from all branches by hand.

3) 건중량 표본채취 및 산정

생중량 대비 건중량을 산정하기 위하여 줄기, 가지, 잎, 열매, 뿌리 등 부위별로 건중량 환산용 표본을 채취하고 현장에서 10g 단위까지 생중량을 측정하였다. 줄기는 1m 간격으로 분리한 후, 0.5m, 1.5m, 2.5m, 3.5m 등의 중앙부에서 두께 5~10cm의 원판을 채취하였다. 가지는 해당 수목의 굵은 가지, 중간 가지, 가는 가지의 구성비를 고려하여 이들을 골고루 섞어 1~2kg을, 뿌리는 그루터기와 타 부위로 구분해 1~3kg을, 그리고 잎과 열매는 각각 1kg씩을 채취하였다. 또한 근원부에서 직경 생장 분석용 줄기 원판을 채취하고, 즉시 이중 비닐백에 넣어 실험실로 운반하였다.

건중량 환산용 표본은 85°C 하 건조기에서 무게가 더 이상 감소하지 않는 향량이 될 때까지 완전히 건조시킨 후, 전자저울로 0.01g 단위까지 건중량을 측정하였다. 부위별 표본의 생중량 대비 건중량의 비를 산출하고, 이를 해당 개체의 생중량에 적용하여 단목(單木)의 부위별 및 전체 건중량(이하 생체량으로 지칭)을 산정하였다.

2. 탄소저장 및 흡수량 계량모델 개발

수목 크기별 생체량 변화를 산출하는 상대성장식을 유도하고, 탄소함량비를 적용하여 생장에 따른 단목의 탄소저장량을 용이하게 추정하는 계량모델을 개발하였다. 탄소함량은 Korean Institute of Agricultural Science and Technology(2000)와 Kang *et al.*(2009)의 방법을 바탕으로 분석하였다. 즉, 각 개체의 줄기, 수피, 가지, 잎, 열매, 뿌리 등 부위별로 3개씩 건조 표본을 채취하여, 약 600°C 하 고온전기로서 최소 6시간 완전히 태운 후 탄소함량을 파악하였다. 그리고, 근원직경, 수고 등을 독립변수로 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여, 탄소저장량을 산정하는 가장 적합한 계량모델과 변수를 최종 도출하였다.

지표면의 근원부에서 채취한 줄기 원판을 대상으로 수령과 연간 직경성장률을 분석하였다. 직경성장률은 각 원판의 4개 직각방향에서 분석한 성장률을 평균하여 산출하였다. 직경성장률을 바탕으로 연간 증가된 생체량을 구하고 이를 탄소량으로 전환하여, 생장에 따른 단목의 탄소흡수량을 용이하게 추정하는 계량모델을 개발하였다. 즉, 연간 직경성장률을 이용하여 전년도의 근원직경을 구하고 이 직경변수를 생체량 상대성장식에 대입하여 전년도의 생체량을 산출하였다. 현년도의 생체량에서 전년도의 생체량을 제감하여 생체량의 연간 증가량 및 탄소흡수량을 산정하였다. 잎과 열매는 분해나 소비를 통해 해마다 탄소를 대기에 환원하므로, 연간 증가된 생체량에서 제감하였다. 그리고, 근원직경, 수고 등을 독립변수로 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여, 생장에 따른 단목의 탄소흡수량을 추정하는 가장 적합한 계량모델과 변수를 도출하였다.

3. 관리실태 조사 및 탄소배출량 산정

사과나무 관리에 의한 탄소배출량을 산정하기 위하여, 연구 대상 과수원의 관리자료 구득, 관리자 면담 및 부분 실측을 통해 관리실태를 조사하였다. 조사내용은 ① 전정의 빈도, 양 및 에너지소비량, ② 제초의 빈도, 양 및 에너지소비량, ③ 관수의 빈도, 시간, 양 및 도구, ④ 시비의 빈도, 종류, 양 및 도구, 그리고 ⑤ 살충제 및 살균제 시용의 빈도, 종류, 양, 도구 및 에너지 소비량 등이었다. 연구대상 과수원에 부가하여, 관리실태의 비교 보강을 위해 전국의 과수원 28개소를 대상으로 추가 조사를 실시하였다(이하 연구대상 과수원은 천전리의 경우 과수원 1로, 고은리는 과수원 2로, 전국 28개소 과수원은 과수원 3으로 각각 지칭). 그리고, 각 조사항목별 내용을 Microsoft Office Excel 2010을 이용하여 통계 분석하였다.

관리행위 중 전정량, 예초량, 관수량, 시비량 및 농약 사용량은 과수원 1과 2의 모니터링을 통해 실측하였다. 전정은 일정 간격의 근원직경 크기를 고려하여 선정한 총 32개체를 대상으로, 겨울철 전정된 가지들을 수거하여 그 양을 10g 단위까지 측정하였다. 예초량은 2×2m의 조사구를 6반복으로 설치하고, 각 방형구 내에서 예초된 초본을 수거하여 현장에서 10g 단위까지 측정하였다. 전정 가지와 예초 초본은 약 1kg씩 각각 10반복, 6반복으로 표본 채취하여 전기한 방법에 의해 생체량을 구하고 탄소함량비를 적용하였다. 초본의 경우 생체량은 0.45를 곱하여 탄소량으로 전환하였다(Olson, 1970; Ajtay *et al.*, 1979). 근원직경 크기에 따른 전정량을 산정하기 위하여, 근원직경을 독립변수로 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 가장 적합한 계량모델을 유도하였다. 관수는 부피눈금이 표시된 비이커로 단위시간당 유출된 채수량을 6반복 측정하여 그 평균치를 산출하였다. 비료와 농약은 현장 사용하는 당일 종류별로 10g 단위까지 측정하여 사용량을 파악하였다.

전정, 예초, 병충해 방제 등을 위한 직접적 에너지소비량은 휘발유 1L 당 탄소 0.57kg의 배출계수(www.climateinsight.or.kr)를 적용하여 탄소량으로 전환하였다. 관수, 시비, 병충해 방제 등에 의한 직접적 및 간접적 에너지소비량은 관련 탄소배출계수가 국내에 부재하여, Pitt(1984), Wells(2001), Lal(2004)

등의 연구를 바탕으로 계수 평균치를 구하여 탄소량을 산출하였다. 즉, 관수는 0.024kg C/kg, 질소비료 1.23kg C/kg, 인산비료 0.20kg C/kg, 칼리비료 0.15kg C/kg, 살충제 3.79kg C/kg, 살균제 3.38kg C/kg 등의 탄소배출계수를 각각 적용하였다. 여기에서, 직접적 배출은 과수원 내에서 도구 가동을 포함하는 화석연료 소비를, 간접적 배출은 시용된 비료나 농약의 제조과정에서 발생하는 화석연료 소비를 각각 지칭한다.

III. 결과 및 고찰

1. 수목 생체량 및 성장기반

연구대상 수목의 근원직경은 3.5~16.5cm의 범위이었고(Table 2 참조), 수고는 1.9~4.9m, 수관폭은 1.4~3.0m 등의 범위이었다. 수령은 최소 5~최대 16년생이었으며, 연간 직경성장률은 최소 0.6~최대 1.1cm/년으로서 평균 0.84±0.4cm/년이었다. 수목의 성장기반인 토양의 물리화학적 특성을 분석한 결과(Table 3 참조), 토성은 과수원에 따라 식토 내지 사양토이었다. 화학성은 각각 pH 4.2 및 5.6, 유기물 1.4%, 전질소 0.07%, 유효인산 176.1 및 625.7mg/kg, 치환성 K⁺ 0.78 및 0.27cmol⁺/kg, 양이온치환능 4.4 및 3.4cmol⁺/kg 등이었다. Korean Institute of Agricultural Science and Technology(2006)에서 제시하는 과수원의 적정 토양기준에 의하면, 과수원 1의 경우 K⁺를 제외한 대부분 항목에서 적정 범위 이하로 나타났으며, 과수원 2 역시 K⁺와 유효인산을 제외한 대부분 항목에서 적정 범위 이하인 것으로 분석되었다.

Table 2. Size and growth rate of tree specimens

Stem diameter at ground level (cm)	Height (cm)	Crown width (m)	Age (yr)	Growth rate of stem diameter (cm/yr) [†]
3.5~16.5	1.9~4.9	1.4~3.0	5~16	0.84 ± 0.4

[†] Mean ± standard error

수목 표본의 전체 생체량은 근원직경 성장에 따라 증가하는 경향이었고, 개체별 직경에 따라 2.1~47.3kg 등의 범위이었다

Table 3. Physical and chemical characteristics of growth soils for tree specimens (mean ± standard error)^{*}

Study orchard	Soil texture	pH	OM (%)	TN (%)	Ava. P (mg/kg)	EC (cmol ⁺ /kg)			CEC (cmol ⁺ /kg)
						K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
1	Clay	4.2 ± 0.2	1.4 ± 0.1	0.07 ± 0.01	176.1 ± 42.1	0.78 ± 0.17	1.15 ± 0.07	1.27 ± 0.30	4.4 ± 0.3
2	SL	5.6 ± 0.4	1.4 ± 0.3	0.07 ± 0.02	625.7 ± 9.3	0.27 ± 0.02	1.22 ± 0.02	0.78 ± 0.08	3.4 ± 0.1
Standard ^{**}	-	6.0~6.5	2.5~3.5	-	200~300	0.3~0.6	5.0~6.0	1.5~2.0	10~15

^{*} Study orchards 1 and 2 are located at Cheonjeon-ri and Goen-ri in Chuncheon, respectively (the same with Table 6 and Figure 2). OM: organic matter, TN: total nitrogen, Ava. P: available P₂O₅, EC: exchangeable cation, CEC: cation exchange capacity, SL: sandy loam

^{**} Source: Korean Institute of Agricultural Science and Technology (2006)

(Figure 1 참조). 부위별 생체량 점유비는 개체에 따라 다소 차이를 보이거나 평균적으로 뿌리가 30.0%로서 가장 많았고, 다음으로 줄기 27.8%, 가지 26.6%, 잎 8.5%, 열매 7.1% 등의 순이었다. 줄기 대비 지상부(줄기, 가지, 잎, 열매)의 생체량 확장계수는 평균 2.65±0.18이었으며, 지하부/지상부 비율은 0.41±0.02이었다. 이와 관련된 국내의 과수 대상의 연구는 전무한 상황이나 도시수목의 경우와 비교하면, 생체량 확장계수는 단풍나무 1.71, 왕벚나무 1.60 등으로서(Jo and Ahn, 2012) 사과나무가 이들 조경수종보다 약 1.5~1.7배 높은 것으로 나타났다. 한편, 사과나무의 지상부/지하부 비율은 단풍나무 0.39, 왕벚나무 0.43 등과 유사한 수준이었다.

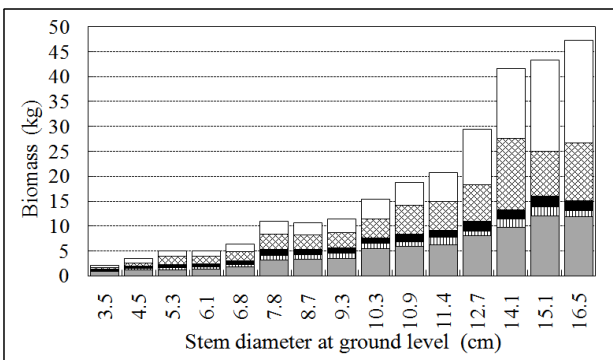


Figure 1. Changes in biomass per apple tree by diameter growth
Legend: □ Stem, ▨ Branch, ■ Leaf, ▤ Fruit, ■ Root

2. 탄소저장 및 흡수

사과나무의 탄소함량은 각 수목 표본의 목질부, 잎 등 부위별 유의한 차이없이($p>0.05$) 생체량의 평균 55.1±0.2%인 것으로 분석되었다. 따라서, 생체량은 0.55를 곱하여 탄소저장 및 흡수량으로 전환되었다. 기존의 관련 연구(Pingrey, 1976; Chow and Rolfe, 1989; Song *et al.*, 1997)는 수목의 목질부 및 잎의 평균 탄소함량이 생체량의 약 50%이라고 보고하였다. 한편, 최근의 다른 연구(Lee and Park, 2007; Kang *et al.*, 2009)는 그 탄소함량이 55%로서, 50%를 적용하는 탄소량 산출은 과소 평가될 수 있음을 제기하였다. 본 사과나무의 경우는 후자에 해당하는데 추후 다양한 탄소분석 방법을 적용하여 비교 검증될 여지가 있다.

Table 4는 최종 도출한 사과나무의 탄소저장 및 흡수량을 산정하는 계량모형을 나타낸다. 이들 계량모형은 F 검정 결과, 통계적으로 유의하였고($p<0.0001$), r^2 이 0.91 이상으로서 적합도가 높았다. Y 절편 및 근원직경의 회귀계수도 t 검정 결과 모두 1% 수준에서 유의성을 보였다. 한편, 독립변수로서 근원직경뿐만 아니라, 수고, 수관폭 등을 포함하는 계량모형을 유도한 결과, 유의한 F 값과 양호한 설명력을 보였으나, 수고나 수

관폭의 회귀계수가 5% 수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 수고를 포함하는 계량모형이 통계적으로 유의하더라도, 현장조사 시 수고의 정확한 측정이 곤란하기 때문에 근원직경만을 이용한 경우보다 오히려 추정오차가 클 수도 있다(Whittaker and Marks, 1975; Park and Lee, 1990). 본 연구에서 제시한 계량모형은 근원직경만을 측정하여 사과나무 단목의 탄소저장 및 흡수량을 용이하게 산정하는데 활용할 수 있다. 탄소흡수 계량모형은 연간 전정에 따른 탄소량을 제감하는 수식을 포함한다.

Table 4. Regression models to quantify carbon storage and uptake per apple tree

Carbon	Regression model*	r^2	p
Storage (kg)	$Y = e^{-2.5543 + 2.0670 \ln D}$	0.9800	<0.0001
Uptake (kg/yr)	$Y = \frac{(e^{-2.7200 + 1.2766 \ln D}) - (e^{-2.7047 + 0.1332 D})^{**}}{D}$	0.9075	<0.0001

* D: stem diameter at ground level (cm)

** Equation to estimate pruned carbon

Table 5는 상기한 계량모형을 적용하여 산정한 근원직경별 탄소저장 및 흡수량을 나타낸다. 탄소저장량은 근원직경 생장과 더불어 증가하였고, 직경급 간 그 차이는 직경이 커질수록 더욱 현저하였다. 근원직경이 2cm 증가할 때마다 사과나무의 탄소저장량은 최소 1.3~최대 2.3배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 최근, Jo and Ahn(2012)은 직접수확법을 통해 단풍나무, 왕벚나무 등 도시 낙엽성 조경수종의 탄소저장량을 산정한 바 있다. 사과나무 단목의 탄소저장량은 근원직경 6cm 기준 단풍나무 1.1kg 및 왕벚나무 2.9kg보다 1.1~2.9배 더 많지만, 근원직경 8cm 이상에서는 단풍나무 및 왕벚나무의 52~85%에 해당하는 것으로 나타났다. 한편, 생체량 산정식을 적용한 미국 산림지 빛나무류의 연구결과(Whittaker and Marks, 1975; Tritton and Hombeck, 1982)와 비교하면, 사과나무의 탄소저장량은 근원직경 전체에 걸쳐 역시 더 적은 것으로 나타났다. 예를 들면, 근원직경 10cm 기준 사과나무 단목의 탄소저장량은 약 9.1kg 으로서, 빛나무류 14.9kg의 61%에 해당하였다. 단풍나무나 왕벚나무의 성목이 자연상태의 사과나무에 비해 훨씬 크지 않지만(Lee, 1985), 본 사과나무의 탄소저장량이 그들 수종보다 적은 이유는 생산 효율성을 위해 해마다 반복되는 전정에 기인하

Table 5. Carbon storage and uptake per apple tree by diameter growth

Carbon	Stem diameter at ground level (cm)						
	4	6	8	10	12	14	16
Storage (kg)	1.37	3.16	5.72	9.07	13.22	18.19	23.97
Uptake (kg/yr)	0.28	0.50	0.75	1.00	1.24	1.48	1.71

는 것으로 분석된다. 휘발유 10L의 소비는 약 5.7kg의 탄소를 대기에 배출하는데(www.climateinsight.or.kr), 근원직경 10cm인 사과나무 한 그루는 16L의 휘발유 소비로부터 배출되는 탄소량을 저장하고 있는 셈이다.

탄소흡수량은 연구대상의 근원직경 범위에서 탄소저장량의 경우와 유사하게 직경생장과 더불어 증가하였고, 직경급 간 그 차이도 직경이 커질수록 증가하는 경향이었다. 근원직경이 2cm 증가할 때마다 탄소흡수량은 최소 1.2~최대 1.8배 증가하는 것으로 나타났다. 연간 전정량을 제감한 사과나무의 탄소흡수량은 단풍나무, 왕벚나무 등 도시 낙엽성 조경수종(Jo and Ahn, 2012)과 적지 않은 차이를 나타냈다. 예를 들면, 근원직경 10cm 기준 사과나무 단목의 탄소흡수량은 약 1.0kg/년으로서, 단풍나무 2.2kg/년 및 왕벚나무 1.8kg/년의 45~56%에 해당하였다. 근원직경 10cm인 사과나무 한 그루는 해마다 약 2L의 휘발유 소비로부터 배출되는 탄소량을 상쇄하는 탄소흡수원 역할을 담당한다.

3. 관리실태 및 탄소배출

1) 전정

과수원 1과 2의 연간 전정빈도는 각각 1회, 과수원 3의 경우 약 1.8±0.1회인 것으로 나타났다. 전정은 휴면기의 동계전정과 생육기의 하계전정으로 구분되는데, 과수원 1과 2는 동계전정만을 실시하였다. 과수원 3의 경우는 겨울 63.5% 및 여름 36.5%로서, 전정을 겨울에 더 많이 실시하는 것으로 나타났다. 사과나무 1주당 실측된 연간 평균 전정량(생체량)은 근원직경 5cm 이하의 소형이 261.3±42.4g/년, 6~10cm의 중형이 366.8±31.6g/년, 11cm 이상의 대형이 785.0±91.1g/년이었다. 전정 후 가지는 과수원 1과 2에서 전량 퇴비로 활용하였고, 과수원 3의 경우 퇴비(68.4%) 또는 소각(31.6%) 처리하였다. 전정기 가동에 소비된 사과나무 1주당 매회 휘발유량 및 연간 탄소배출량은 과수원 2에서 각각 11.4mL/회 및 6.5g/년으로서(Table 6 참조), 과

수원 3의 탄소배출량인 10.3±0.1g/년의 63%에 해당하였다. 과수원 3의 경우, 매회 전정에 소비된 휘발유량은 10.0±0.1mL/회로서 과수원 2와 유사하였지만, 전정기의 가동빈도가 높아 연간 탄소배출량이 더 많았다. 한편, 과수원 1에서는 화석연료 소비와 무관한 수동 톱 및 가위로 전정하였다.

2) 제초

제초는 연구대상 과수원 모두 제초제를 사용하지 않고 예초기에 의존하였다. 제초의 연간 빈도는 과수원 1 및 2가 3~5회, 과수원 3이 3.8±0.3회 등이었다. 제초 시기는 과수원 모두에 걸쳐 주로 여름이었고, 부가적으로 봄과 가을에 각각 1회 실시되었다. 단위면적당 연간 예초량(생체량)은 대상 과수원에 따라 231.7~344.4g/m²/년이었으며, 이는 대부분 퇴비로 활용되는 것으로 나타났다. 예초기 가동에 따른 사과나무 1주당 매회 휘발유량 및 연간 탄소배출량은 과수원 1에서 각각 22.4mL/회 및 63.7g/년, 과수원 2에서 22.9mL/회 및 39.1g/년이었으며, 과수원 3의 경우 11.3±1.8mL/회 및 23.8±5.1g/년이었다. 연간 탄소배출량은 제초 빈도가 더 높은 과수원 1에서 타 과수원에 비해 1.6~2.7배 더 많았다.

3) 관수

관수의 연간 빈도는 과수원 1에서 약 2회로서, 과수원 2의 16회 및 과수원 3의 26.4±4.8회에 비해 훨씬 낮았다. 관수의 매회 시간길이는 과수원 1에서 약 240분, 과수원 2에서 77분, 과수원 3에서 132±25분 등이었다. 과수원 1과 2의 관수시설은 각각 분사관수(spray irrigation) 및 점적관수(drip irrigation) 방식이었다. 단위시간당 실측한 관수량은 과수원 1에서 약 586mL/분, 과수원 2에서 54mL/분으로서, 분사관수가 점적관수보다 약 11배 더 많은 물을 소비하는 것으로 나타났다. 사과나무 1주당 매회 관수량 및 연간 탄소배출량은 과수원 1에서 각각 140.6L/회 및 6,750.7g/년으로서 낮은 빈도에도 불구하고 그 양이 가장 많았고, 다음으로 과수원 3에서 5.9±1.9L/회 및 3,617.7±1,099.7g/년, 과수원 2에서 4.1L/회 및 1,589.8g/년 등의 순이었다. 따라서, 관수에 따른 에너지소비 및 탄소배출을 저감하기 위해서는 분사관수보다 점적관수가 바람직하다.

4) 시비

과수원 1과 2의 연간 시비빈도는 각각 2회로서, 평균 2.6±0.3회인 과수원 3보다 낮은 경향이었다. 과수원 1과 2의 사과나무 1주당 매회 시비량은 N 37.3~56.0g/회이었고, P 16.3~24.5g/회, K 11.7~17.5g/회 등이었다. 과수원 3의 경우, N 46.3±4.2g/회, P 22.8±1.8g/회, K 25.3±1.3g/회 등이었다. 과수원 1의 매회 시비량은 N의 경우 과수원 3보다 약 1.2배 많았고, 과수원 2의 경우는 N, P, K 모두 과수원 3의 47~81%에 해당하였다.

Table 6. Annual carbon emissions per apple tree from management practices

Management	Study orchard (g/yr)		
	1	2	3*
Pruning	0.0	6.5	10.3
Mowing	63.7	39.1	23.8
Irrigation	6,750.7	1,589.3	3,617.7
Fertilization	152.8	101.8	167.3
Pesticide	79.6	91.0	107.1
Fungicide	71.4	108.8	44.2
Total	7,118.2	1,936.5	3,970.4

* Average from 28 orchards except orchards 1 and 2

Korean Institute of Agricultural Science and Technology (2006)의 시비처방 기준에 의하면, 과수원 1과 2의 사과나무 1주당 매회 K 시비량은 시비기준 22.5g/회의 52~78%에 해당하는 양이었으나, N 및 P의 경우는 시비기준보다 1.2~1.8배 더 많았다. 과수원 3에서의 N, P 및 K 시비량 역시 시비기준보다 1.1~1.7배 초과하는 것으로 분석되었다. 이들의 시비에 의한 사과나무 1주당 연간 탄소배출량은 과수원 3에서 167.3±30.7g/년으로서 가장 많았고, 다음으로 과수원 1에서 152.8g/년, 과수원 2에서 101.8g/년 등의 순이었다. 시비기준에 따른 연간 탄소배출량은 훨씬 적은 89.6g/년으로서, 시비기준의 적용을 통해 탄소배출을 저감함이 바람직하다.

5) 병충해 방제

살충제의 연간 사용빈도는 과수원 1에서 15회로서 가장 높았고, 과수원 3이 7.4±0.7회, 과수원 2가 6회 등이었다. 사과나무 1주당 살충제의 매회 사용량은 과수원 2에서 4.0g/회, 과수원 3이 3.8±0.3g/회, 과수원 1이 1.4g/회 등이었다. 살충제 사용에 의한 연간 탄소배출량은 과수원 3에서 107.1±25.4g/년으로서 가장 많고, 다음으로 과수원 2가 91.0g/년, 과수원 1이 79.6g/년 등의 순이었다. 살균제의 연간 사용빈도는 과수원 1에서 가장 높은 15회이었고, 과수원 3이 8.3±0.5회, 과수원 2가 8회 등이었다. 사과나무 1주당 매회 그 사용량은 과수원 2에서 살충제의 경우와 같이 4.0g/회로서 가장 많았고, 과수원 3이 1.6±0.2g/회, 과수원 1이 1.4g/회 등이었다. 살균제 사용에 따른 사과나무 1주당 연간 탄소배출량은 과수원 2에서 108.8g/년으로서, 사과수원의 44.2~71.4g/년에 비해 1.5~2.5배 더 많았다. 대상 과수원에서 주로 사용하는 살충제는 나방, 응애 및 진딧물을 예방하는 이미다클로프리드, 아세타미프리드, 에토펜프록스, 클로란트라닐리프롤 등이었고, 살균제는 갈반병, 탄저병 등을 예방하기 위한 이미녹탄딘트리아세테이트, 테부코나졸, 디티아논 등이었다.

Korea Crop Protection Association(2011)는 농약의 안전사용 기준으로서, 사과나무 1주당 연간 사용빈도는 약제별로 3~5회 이하, 매회 사용량은 2.3g/회 이하로 제한하고 있다. 이 기준에 따른 연간 탄소배출량은 살충제 약 42.6g/년, 살균제 38.3g/년에 해당하나, 연구대상 과수원들은 이보다 살충제 1.9~2.5배, 살균제 1.2~2.8배 더 많은 탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 따라서, 농약의 사용기준을 준수하여 병충해 방제 관련 관리비용 및 탄소배출을 저감할 필요가 있다.

4. 탄소수지 및 저탄소형 관리

단위면적당 탄소저장 및 흡수량은 과수원 1에서 각각 1.56t/ha, 0.14t/ha/년이고, 대형 수목이 더 많고 수목밀도가 더 높은

과수원 2에서 5.43t/ha 및 0.62t/ha/년이었다(Figure 2 참조). 관리에 따른 단위면적당 연간 탄소배출량은 과수원 2에서 1.64t/ha/년, 과수원 3이 1.26t/ha/년, 과수원 1이 0.89t/ha/년 등이었다. 그 중 관수에 의한 탄소배출량이 83.5~95.7%로서 가장 많았고, 다음으로 병충해 방제 2.3~12.1%, 시비 1.2~1.9%, 제초 0.9~2.1%, 전정 0.3% 등의 순이었다. 이와 같이, 탄소배출량은 과수원별 관리강도 및 방식에 따라 특히 관수와 관련하여 적지 않은 변이를 보였다. 과수원 1과 2를 합계하면, 단위면적당 탄소저장 및 흡수량은 각각 3.81t/ha, 0.42t/ha/년이고, 연간 탄소배출량은 1.33t/ha/년이었다. 즉, 탄소저장량은 연간 탄소배출량의 2.9배에 해당하였으나, 연간 탄소배출량은 탄소흡수량보다 약 3.2배 더 많았다. 한편, 낙엽을 포함한 전정 및 예초의 양은 퇴비로서 해마다 토양탄소 유입에 기여하였고, 그 양은 0.18t/ha/년인 것으로 나타났다.

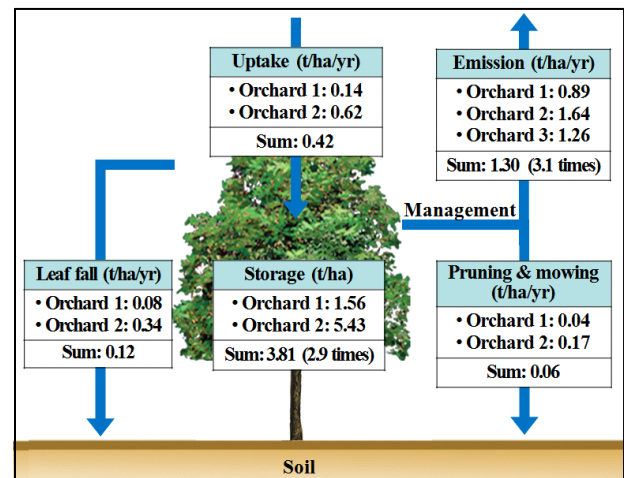


Figure 2. Carbon budgets in study orchards

결국, 과수원의 탄소저감 효과를 증진하기 위해서는 탄소배출을 최소화할 관리방안이 요구된다. 관리행위 중 탄소배출이 가장 많은 관수의 경우, 분사관수에 의한 에너지 소비량이 점적관수보다 단위시간당 약 11배나 더 많으므로, 점적관수 방식을 통해 탄소배출을 저감함이 바람직하다. 병충해 방제는 농약의 사용기준을 준수하되, 사과나무 재배 시 많이 발생하는 응애류, 진딧물 등은 천적을 이용하여 방제할 수 있다. 국외에서는 진딧물의 천적으로 이미 풀잠자리류 및 무당벌레류를 대량 증식하여 판매하고 있다(www.gca.or.kr). 비료는 전기한 시비기준(Korean Institute of Agricultural Science and Technology, 2006)을 준수하거나, 농업기술센터의 토양정밀검정 서비스를 이용하여 토양 분석 후 처방에 따라 적정 시비량을 적용한다. 제초는 화석연료를 소비하는 예초기 가동을 최소화하거나, 녹비작물 등을 재배하여 잡초 유입을 방지하면서 제초 요구도를 사전 제어한다. 대표적인 녹비작물로는 자운영, 보리, 호밀 등

이며 이는 토양에 유기물을 공급하여 화학비료 시용도 절감할 수 있다. 전정 가지는 토양 내의 탄소축적을 도모하기 위해 소각 대신 퇴비, 멀칭재료 등으로 활용할 필요가 있다. 사과나무 1주당 탄소배출량이 상대적으로 많은 과수원 1에서 상기한 점적관수 방식을 도입하고, 병충해 방제기준(Korea Crop Protection Association, 2011) 및 시비기준(Korean Institute of Agricultural Science and Technology, 2006)을 적용하는 경우, 연간 탄소배출량은 0.11t/ha/년으로서 기존 배출량을 87.6%나 저감하고 탄소흡수량은 배출량보다 1.3배 많은 것으로 분석된다. 이는 생산형 녹지의 관리강도 및 방식을 개선함으로써 탄소배출원을 흡수원으로 전환할 수 있음을 시사한다.

IV. 결론

대기 탄소농도의 증가에 따른 기후변화 대응과 관련하여 저탄소형 녹지조성 및 관리에 관심이 점차 증가하고 있는 상황이다. 조경분야에서는 도시녹지 또는 조경수의 탄소흡수에 초점을 맞추어 연구가 진행되어 왔으나, 과수원을 포함하는 농업적 생산기능의 녹지에 의한 탄소흡수 및 배출을 계량화한 국내외 연구는 부재하다. 본 연구는 생산형 녹지로서의 과수원을 대상으로 사과나무에 의한 탄소저장 및 흡수량을 산정하고, 재배과정에서 관리에 기인하여 발생하는 연간 탄소배출량을 구명하여 탄소저감 효과를 계량화하였다. 연구대상 과수원에서 정상 성장하는 다양한 크기의 근원직경 대부분을 포함하여 총 15개체의 수목을 구입하고, 현장에서 근굴취를 포함하는 직접수확법에 의해 개체당 부위별 생중량을 측정하였다. 개체별로 줄기, 가지, 잎, 열매, 뿌리 등으로 구분하여 채취한 표본을 건조시킨 후, 생체량 측정과 탄소함량 분석을 통하여 탄소저장량을 산출하였다. 근원부의 줄기 원편을 채취하여 직경생장을 분석하고 탄소흡수량을 산정하였다. 관리자료의 구득, 관리자 면담 및 부분 실측을 바탕으로, 전정, 제초, 관수, 시비, 병충해 방제 등을 포함하는 관리실태를 조사하고 연간 탄소배출을 계량화하였다.

근원직경을 독립변수로 생장에 따른 사과나무 단목의 탄소저장 및 흡수를 계량화하는 활용 용이한 계량모델을 유도하였다. 계량모델의 r^2 은 0.91~0.98의 범위로서 적합도가 높았으며, Y 절편 및 근원직경의 회귀계수도 1% 수준에서 유의성을 보였다. 단목의 탄소저장 및 흡수량은 모두 직경생장과 더불어 증가하였고, 직경급 간 그 차이도 직경이 커질수록 증가하는 경향이었다. 즉, 근원직경이 2cm 증가할 때마다 탄소저장량은 최소 1.3~최대 2.3배, 탄소흡수량은 최소 1.2~최대 1.8배 증가하는 것으로 나타났다. 근원직경 10 및 15cm인 사과나무 단목은 각각 9.1 및 21.0kg의 탄소를 저장하고, 연간 1.0 및 1.6kg의 탄소를 흡수하는 것으로 나타났다. 근원직경 10cm인 사과나무는 16L의 휘발유 소비로부터 배출되는 탄소량을 저장하는 셈

이었고, 해마다 2L의 휘발유 소비로부터 배출되는 탄소량을 상쇄하는 역할을 담당하였다. 연구대상 과수원의 단위면적당 탄소저장 및 흡수량은 각각 3.8t/ha, 0.42t/ha/년이고, 연간 탄소배출량은 1.30t/ha/년이었다. 연간 탄소배출량은 탄소저장량의 약 35%에 해당하였으나 탄소흡수량보다 3배 더 많았다. 관리행위 중 관수에 의한 탄소배출량이 가장 많았고, 다음으로 병충해 방제, 시비, 제초 등의 순이었다. 연구결과를 토대로, 관수, 농약, 비료 등의 효율적 적용을 포함하는 저탄소형 관리방안을 모색하였다. 한편, 사과나무 굴취는 작업에 따른 인접 수목의 생산피해를 우려하는 경영주의 요청에 따라 수확 직전을 피하여 7월 중순에 실시하였다. 굴취 후부터 성장기간 말기까지 측정된 유사 규격 수목의 추가 성장량은 근원직경의 경우, 평균 약 1mm이었다. 이 추가 생장에 따른 단목의 탄소저장량 및 흡수량은 제시한 결과치 대비 각각 평균 2.9%, 1.8% 더 많은 양으로서 큰 차이를 보이지는 않았다.

본 연구는 근굴취를 포함한 직접수확법을 통해 생산형 녹지의 탄소저감 효과를 계량화하는 난이성이나 복잡성을 극복하는데 있어, 국내외에 걸쳐 선구적인 역할을 감당하였다. 즉, 대표적 해결과제는 소득용 재배과수를 대상으로 벌목을 위한 다수의 수목표본을 구입하는 난제, 수목의 현장 굴취와 부위별 생중량 측정, 다수 생중량 표본의 장기간 건조과정과 탄소함량 분석 등이었다. 연구결과는 녹지의 탄소흡수 및 배출 계량평가, 기후변화 대응형 녹지조성 및 관리 등에 유용할 뿐만 아니라, 저탄소형 조경수 생산에도 응용 가능할 것으로 기대한다. 본 연구의 한계는 경영주가 재배과수의 굴취에 비협조적이고, 고가의 비용을 요구하는 등 굴취수목 구입의 난이성에 기인하여, 특정 수종과 일부 지역에 국한하였다는 점이다. 향후, 대표적 타 재배수종을 포함한 상이한 재배환경을 대상으로 실측 연구를 추진하여 본 결과를 검증하고, 관련 정보를 구축할 필요가 있다.

References

1. Ajtay, L. L., P. Ketner, and P. Duvigneaud(1979) Terrestrial production and phytomass. In Bolin, B., E. T. Degens, S. Kempe, and P. Ketner, eds., *The Global Carbon Cycle*, SCOPE Report No. 13, New York: John Wiley & Sons. pp. 129-181.
2. Birdsey, R. A.(1992) Methods to estimate forest carbon storage. In R. N. Sampson and D. Hair, eds., *Forests and Global Change* (Vol. 1), Washington, D.C.: An American Forests Publication, pp. 255-261.
3. Chow, P. and G. L. Rolfe(1989) Carbon and hydrogen contents of short rotation biomass of five hardwood species. *Wood and Fiber Science* 21(1): 30-36.
4. Jo, H. K.(1999a) Carbon uptake and emissions in urban landscape, and the role of urban greenspace for several cities in Kangwon Province. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 27(1): 39-53.
5. Jo, H. K.(1999b) Energy consumption and carbon release from management of urban vegetation. *Korean Journal of Environment and Ecology* 13(2): 101-108.

6. Jo, H. K.(2002) Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management* 64: 115-126.
7. Jo, H. K. and D. H. Cho(1998) Annual CO₂ uptake by urban popular landscape tree species. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 26(2): 38-53.
8. Jo, H. K., J. Y. Kim, and H. M. Park(2013a) Carbon storage and uptake by evergreen trees for urban landscape - for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*. *Korean Journal of Environment and Ecology* 27(5): 571-578.
9. Jo, H. K., S. M. Park, J. Y. Kim, and H. M. Park(2013b) Effects of orchards on carbon reduction. *Proceeding of Korean Society of Environment and Ecology Conference* 23(2): 56-56.
10. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2000) Indicators of carbon storage and uptake by tree growth in natural ecosystem. *Korean Journal of Environment and Ecology* 14(3): 175-182.
11. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2001) Annual CO₂ uptake and atmospheric purification by urban coniferous trees - for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*. *Korean Journal of Environment and Ecology* 15(2): 118-124.
12. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2012) Carbon storage and uptake by deciduous tree species for urban landscape. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(5): 160-168.
13. Kang, K. N., G. S. Park, S. J. Lee, H. G. Lee, and Y. T. Kim(2009) Carbon storages of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* stands in Gyeongju, Chungnam Province. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 12(6): 143-152.
14. Korea Crop Protection Association(2011) Guidelines of Agricultural Chemicals Application. Seoul.
15. Korea Forest Research Institute(2007) Survey Manual for Forest Biomass and Soil Carbon. Seoul.
16. Korea Forest Research Institute(2010a) Carbon Emission Coefficients of Major Tree Species to Inventory Greenhouse Gases from Forests. Research Report 10-25.
17. Korea Forest Research Institute(2010b) Greenhouse Gas Inventory of Urban Green Areas - in Case of Seoul Metropolis. Research Report 10-19.
18. Korean Institute of Agricultural Science and Technology(2000) Methods of Analysis for Soil and Plants. Suwon.
19. Korean Institute of Agricultural Science and Technology(2006) Recommendation of the Amount of Fertilizer for Crops. Suwon.
20. Lal, R.(2004) Carbon emission from farm operations. *Environmental International* 30: 981-990.
21. Lee, S. J. and G. S. Park(2007) Carbon storage in aboveground of *Betula platyphylla* and *Juglans mandshurica* plantations, Chungju, Korea. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 10(6): 62-69.
22. Lee, T. B.(1985) Illustrated Flora of Korea. Seoul: Hyangmunsa.
23. Lee, T. K., K. S. Chang, K. S. Park, and S. W. Lee(1997) Analysis of carbon fixation in natural forests of *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis*. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology* 31(6): 828-832.
24. McPherson, E. G.(1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24(4): 215-223.
25. McPherson, E. G. and J. R. Simpson(2000) Carbon dioxide reduction through urban forestry: Guidelines for professional and volunteer tree planters. General Technical Report PSW-GTR-171. Albany, CA: USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station.
26. Milne, R. and T. A. Brown(1997) Carbon in the vegetation and soils of Great Britain. *Journal of Environmental Management* 49: 413-433.
27. Nowak, D. J.(1994) Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In McPherson, E. G., D. J. Nowak, and R. A. Rowntree, eds., *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. General Technical Report NE-186. Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. pp. 83-94.
28. Nowak, D. J. and D. E. Crane(2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution* 116: 381-389.
29. Olson, J. S.(1970) Carbon cycles and temperate woodland. In D. E. Reichle, ed., *Analysis of Temperate Ecosystems*, Ecological Studies 1. New York: Springer-Verlag. pp. 227-241.
30. Park, E. J. and K. Y. Kang(2010) Estimation of C storage and annual CO₂ uptake by street trees in Gyeonggi-do. *Korean Journal of Environment and Ecology* 24(5): 591-600.
31. Park, I. H. and S. M. Lee(1990) Biomass and net production of *Pinus densiflora* natural forests of four local forms in Korea. *Journal of Korean Forestry Society* 79(2): 196-204.
32. Pingrey, D. W.(1976) Forest products energy overview. In *Energy and the Wood Products Industry*. Madison, WI: Forest Products Research Society. pp. 1-14.
33. Pitt, G. D.(1984) Conservation of embodied energy through landscape design. In E. G. McPherson, ed., *Energy-Conserving Site Design*. Washington, D.C.: ASLA. pp. 215-229.
34. Rural Development Administration(2008) Study on Carbon Sink Agricultural Sector Regarding to UNFCCC. Research Report 121-135.
35. Song, C. Y., J. J. Choi, J. S. Kim, H. C. Lee, and H. M. Ro(2013) Carbon and nitrogen stocks of tree and soils in a 'Nittaka' pear orchard. *Journal of Korean Forest Society* 86(1): 35-45.
36. Song, C. Y., K. S. Chang, K. S. Park, and S. W. Lee(1997) Analysis of carbon fixation in natural forests of *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis*. *Journal of Korean Forest Society* 86(1): 35-45.
37. Tritton, L. M. and J. M. Hornbeck(1982) Biomass Equations for Major Tree Species of the Northeast. General Technical Report NE-69. Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
38. Wells, C.(2001) Total Energy Indicators of Agricultural Sustainability: Dairy Farming Case Study. Wellington: Ministry of Agriculture and Forestry. MAF Policy.
39. Whittaker, R. H. and P. L. Marks(1975) Methods of assessing terrestrial productivity. In Lieth, H. and R. H. Whittaker, eds., *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag. pp. 55-118.
40. <http://www.climateinsight.or.kr>
41. <http://www.gca.or.kr>
42. <http://www.greengrowth.go.kr>
43. <http://www.kostat.go.kr>
44. <http://www.mafra.go.kr>

원 고 접 수 일: 2014년 8월 1일
 심 사 일: 2014년 9월 16일(1차)
 2014년 10월 8일(2차)
 계 재 확 정 일: 2014년 10월 8일
 3 인 의 명 심 사 필