

‘신고’배 재배지 내 수체 및 토양의 탄소 및 질소 저장량

이태규^{1,2†} · 최장전^{3†} · 김종성^{1,2} · 이한찬³ · 노희명^{1,2*}

¹서울대학교 농생명공학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원, ³농촌진흥청 국립원예특작과학원 배시험장

Carbon and Nitrogen Stocks of Trees and Soils in a ‘Niitaka’ Pear Orchard

Tae-Kyu Lee^{1,2†}, Jang-Jeon Choi^{3†}, Jong-Sung Kim^{1,2}, Han-Chan Lee³, and Hee-Myong Ro^{1,2*}

¹Department of Agricultural Biotechnology, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

²Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

³Pear Research Station, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Rural Development Administration, Naju 520-820, Korea

Abstract. To report country-specific carbon and nitrogen stocks data in a pear orchard by Tier 3 approach of 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, an experimental pear orchard field of the Pear Research Station, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Rural Development Administration, Naju, Korea (35°01'27.70 N, 126°44'53.50"E, 6 m altitude), where 15-year-old ‘Niitaka’ pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Niitaka) trees were planted at a 5.0 m × 3.0 m spacing on a Tatura trellis system, was chosen to assess the total amount of carbon and nitrogen stocks stored in the trees and orchard soil profiles. At the sampling time (August 2012), three trees were uprooted, and separated into six fractions: trunk, main branches, lateral branches (including shoots), leaves, fruits, and roots. Soil samples were collected from 0 to 0.6 m depth at 0.1 m intervals at 0.5 m from the trunk. Dry mass per tree was 4.7 kg for trunk, 13.3 kg for main branches, 13.9 kg for lateral branches, 3.7 kg for leaves, 6.7 kg for fruits, and 14.1 kg for roots. Amounts of C and N per tree were respectively 2.3 and 0.02 kg for trunk, 6.4 and 0.07 kg for main branches, 6.4 and 0.09 kg for lateral branches, 6.5 and 0.07 kg for roots, 1.7 and 0.07 kg for leaves, and 3.2 and 0.03 kg for fruits. Carbon and nitrogen stocks stored between the soil surface and a depth of 60 cm were 138.29 and 13.31 Mg·ha⁻¹, respectively, while those contained in pear trees were 17.66 and 0.23 Mg·ha⁻¹ based on a tree density of 667 trees·ha⁻¹. Overall, carbon and nitrogen stocks per hectare stored in a pear orchard were 155.95 and 13.54 Mg, respectively.

Additional key words: carbon stocks, IPCC 2006 guideline, nitrogen stocks, net primary productivity, *Pyrus pyrifolia*, Tier 3

서 언

국가간 기후변화 협의체인 IPCC에서는 2006년 농업분야의 온실가스 배출권 측정에 대한 새로운 지침을 제시하였다(IPCC, 2006). 이 지침은 일년생 작물은 인정하지 않고 다년생 목본류 작물(woody crop)에 대해서만 평가를 인정하는데, 작물의 연간 생체중의 변화량을 측정하여 탄소를 얼마나 흡수하는지에 대하여 평가하도록 제시하고 있다(IPCC,

2006). 또한 이 지침에 따르면 단계별로 평가가 진행되는데, Tier 1에서는 단순 생체중의 변화량을, Tier 2에서는 탄소의 변화량을 제시하도록 되어 있으며, Tier 3에서는 Tier 2에 재배지 관리를 포함한 지역적인 특성과 통계적 방법을 적용한 좀 더 정밀한 측정을 요구하고 있다(IPCC, 2006).

하지만 국내에서는 아직까지 농업부문에서의 탄소 배출권을 인정받기 위한 연구가 많이 진행되지 못하고 있는 실정이다. 국내 과수 재배 면적은 2012년 통계에 의하면, 노지에서

*Corresponding author: hmro@snu.ac.kr

†These authors contributed equally to this work.

※ Received 3 July 2013; Revised 9 October 2013; Accepted 7 November 2013. 본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ008986042013)과 한국연구재단의 BK21사업 지원에 의해 수행되었음.

1523.87km², 시설에서 895.41km²로 총 2419.28km²이며, 전체 농경지의 약 14%에 해당하는 면적이다(KOSIS, 2012). 이는 우리나라 전체 농경지 중에서 높은 비율이라고는 볼 수 없으나, 농경지의 대부분이 논과 밭으로 구성되어 있는 우리나라에서, IPCC 2006 지침에 따라 작물에 의한 온실가스 격리 평가를 할 경우에는 오히려 과수 재배지의 중요성이 더 높게 나타난다고 볼 수 있다. 국내 과수 재배지는 2012년 기준으로 사과 재배지가 307.34km²로 가장 넓은 면적을 차지하고 있어 농촌진흥청에서는 15년생 사과 재배지에서 평가를 진행하여 2004년부터 3년간의 순1차생산량(Net Primary Productivity, NPP)을 얻었는데, 그 결과 과실을 제외한 과수에서의 NPP가 연간 0.44kg C·m⁻²에 이르는 것으로 조사되었다(Lee, 2008). 하지만 사과 이외의 다른 과수에 관한 연구는 거의 이루어지지 않아서, 온실가스 흡수 효과가 클 것으로 예상되는 과수원이 저장하고 있는 수체와 토양의 탄소와 질소 함량을 산정하는 방법을 제안하고, 이를 통해 일어난 과수원의 탄소 및 질소의 저장량에 대한 정량적 연구가 시급한 실정이다.

따라서 본 연구는 IPCC 2006 지침에 의거하여 국내 배 재배지를 대상으로 수체와 토양이 저장하고 있는 탄소와 질소의 양을 평가하고자 하였다. 배(*Pyrus pyrifolia* Nakai)는 배나무속(*Pyrus*)에 속하는 낙엽성 교목으로, 한국에서는 1906년 일본에서 개량된 남방형 동양배 품종들이 도입되어 재배되고 있다. 이 중 ‘신고(Niitaka)’ 배는 일본에서 1927년 육성되었는데, 나무의 세력이 강하고 크게 자라는 성질이 있어 생산성이 높아 1930년대에 도입되어 한국에서 재배되는 대표적인 품종으로 자리잡았다. 현재 국내에서는 143.53km² 면적에 배가 재배되고 있는데, 그 중 82.7%인 118.66km²에서 ‘신고’배가 재배되고 있다(KOSIS, 2012). 본 연구에서는 ‘신고’배 과수원에서의 수체 및 토양이 저장하고 있는 탄소 및 질소 보유량을 Tier 3 단계에서 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

시험 재료는 전남 나주에 위치한 농촌진흥청 배시험장 재배포장(35°01'27.70 N, 126°44' 53.50"E, 6m Altitude)에 5.0 × 3.0 m로 재식된 Y자형 신고(*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Niitaka) 15년생을 사용하였고, 평균 수고는 2.5m였으며 2012년 8-9월경에 배나무 3주를 임의로 선정하여 각각에 대해 잎과 과일을 수확하고 측지, 주지, 주간을 절단한 후에 지하부를 굴취하여 시료로 채취하여 분석하였다. 관수와 시비 관리 등 시험수의 일반적 재배관리는 농촌진흥청 배나무 표준재배법에 준하였다(RDA, 2000). 2012년 14년생 배의 생

산량은 1000m²당 3,418kg이었다. 시험포장의 토양은 토성이 실트질 식토(silty clay)로, Udalfs 아목에 속하며, 자갈이나 모래가 거의 없고, 심토에 경반층이 있어 배수가 불량한 특성을 갖고 있다. 한편, 표층은 높은 유기물함량에 의해 전용적 밀도가 1.06Mg·m⁻³로 낮은 반면, 심층은 1.46Mg·m⁻³로 높았다. 토성은 토양을 풍진 후 2mm 표준 체를 통과한 시료를 과산화수소로 유기물을 제거한 후에 wet sieving/pipette method를 이용하여 분석하였다(Day, 1986). 표토와 심토의 전용적 밀도는 직경 5cm core를 이용하여 각각 0-10cm, 10-20cm 깊이에서 측정하였다.

배나무 지상부 기관은 배나무 주간, 주지, 측지로 구분하여 채취하였고, 지하부는 뿌리가 분포하는 대략 1m 정도의 깊이까지 파서 일부 잔뿌리를 제외한 전체 형태를 유지하며 채취하였다. 상층부의 잎과 과일을 수확하였으며, 과일은 다시 과육, 과심, 과피로 나누었다. 수체의 각 부위는 생체중을 측정 한 후, 건조 오븐(DS-80-2, Dasol Scientific Co., Korea)에서 65°C로 건조시킨 후 건물중을 측정하였다. 토양은 배나무 주간으로부터 약 50cm 가량 떨어진 지점에서 60cm 깊이까지 10cm 간격으로 채취하여, Kjeldahl Protein/Nitrogen Analyzer(Kjeltec Auto 1035/1038 System, Tecator AB, Sweden)를 이용하여 무기태질소 농도를 측정 한 후 풍진시켰다. 토양 시료는 각 3 반복으로 채취하였으며, 채취한 수체의 각 부위와 토양 시료의 일부를 곱게 갈아 원소분석기(Flash EA 1112, Thermo Scientific, USA)를 이용하여 총 탄소 및 질소 함량을 측정하였다. 측지는 연차별로 측정 한 건물중에 가중치를 두어 측지 전체의 평균 탄소 및 질소 함량을 구하였고, 과일도 같은 방법으로 과육, 과심, 과피의 건물중에 가중치를 두어 평균 탄소 및 질소 함량을 얻었다.

수체의 물리적 특성은 ASTM method(ASTM, 2008)에 의하여 반복적 이상치 검출(repeated outlying)을 통하여 특이치(outlier)를 제거한 후 분석하였다(Fortini and Luko, 2011). 수체와 토양의 탄소와 질소 함량, 무기태 질소의 농도는 SAS 9.3 software(SAS Institute Inc., USA)를 이용하여 5% 유의수준에서 ANOVA를 실시하였고, Duncan's multiple range test를 통하여 평균간의 차이를 비교하였다.

결과 및 고찰

수체의 부위별 생체중과 건물중은 Table 1과 같다. Y자수형의 배나무는 주간에서 유인된 두 개의 주지에 신초(1년생)로부터 7년생까지의 측지가 생성되었으며, 신초(shoot)의 생체중과 건물중이 가장 많았다. 하지만 2년생 측지부터 질량이 감소하는 것을 볼 수 있었으나, 어떤 특정한 경향은

발견할 수 없었다. 이는 생장조건의 변화와 전정과 같은 근단 조정(apical control), 적과에 의한 복합효과로 보일 수 있으나, 기상 역시 연차별 생체중과 건물중의 변화에 영향을 주었다고 볼 수 있다(Kozlowski, 1964; Wilson, 2000). 기상청 자료에 따르면 2009년부터 2011년까지 월별 평균기온의 차는 별로 없었으나, 2009년 7월의 강수량이 약 860mm로 2010년의 352mm, 2011년의 251mm보다 매우 많았기 때문에, 재배관리와 기상요건이 과수의 생육에 영향을 주었을 것으로 보였다(KMA, 2009-2011; Kozlowski, 1964; Wilson, 2000). 시료 채취 당시, 과수원 토양 내 무기태 질소(NH₄⁺-N, NO₃⁻-N)의 함량은 과수가 생육하기에 부족하지 않았던 질소의 공급을 확인할 수 있었다(Table 2). 일반적으로 질산태 질소(NO₃⁻-N)의 함량이 토양전반에서 암모늄태 질소(NH₄⁺-N)의 함량보다 높아, 이는 토양의 통기성이 나쁘지 않은 것을 간접적으로 보여주었다.

한편, 잎과 과일의 경우 생체중 및 건물중에서 편차가 컸

Table 1. Fresh and dry mass of each parts of pear trees.

Parts	Fresh mass (kg·tree ⁻¹) ^z	Dry mass (kg·tree ⁻¹)
Trunk	10.18 (1.55) ^y	4.68 (0.47)
Main Branches	26.93 (4.26)	13.32 (3.27)
Lateral Branches		
1-year	8.70 (1.83)	3.56 (1.03)
2-year	3.43 (0.95)	1.58 (0.73)
3-year	3.54 (0.89)	1.78 (0.24)
4-year	3.47 (1.21)	1.82 (0.75)
5-year	4.69 (2.00)	2.34 (0.88)
6-year	4.32 (1.83)	2.14 (0.83)
7-year	1.24 (-)	0.68 (-)
Roots	N.A. ^x	14.08 (3.84)

^zThe values in the table are outlain by ASTM E178-08 method.

^yThe values in parentheses indicate standard deviations (n = 3 except 7-year-old lateral branch for n = 1).

^xNot available.

Table 2. Inorganic nitrogen concentrations of pear orchard soils.

Depth (cm)	NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)
0 - 10	4.64 (3.71) ^z a ^y	10.20 (9.48) a
10 - 20	2.36 (3.15) a	6.58 (6.90) ab
20 - 30	2.18 (2.51) a	5.48 (6.68) ab
30 - 40	5.57 (4.57) a	3.64 (4.90) b
40 - 50	1.89 (3.27) a	2.29 (2.22) b
50 - 60	1.75 (2.26) a	3.06 (5.30) b

^zThe values in parentheses indicate standard deviations (n = 3).

^yMeans in the same column with different letters represent result of Duncan's multiple range test (*p* < 0.05).

다(Table 3). 특히 잎의 경우 표준편차가 상당히 컸는데, 이는 전정에 따른 잎의 손실과, 잎 수의 차이 및 측정 과정에서 오차가 원인이었을 것이라 생각하였다. 주당 잎의 생체중은 약 10.17kg 정도로 주간의 생체중(10.18kg)과 비슷한 수준인 것으로 나타났으며, 과일의 경우 51.28kg으로 단일 부위로는 생체중이 가장 컸다. 과일의 경우 생체중과 건물중에서 모두 과육이 차지하는 비율이 매우 크게 나타났던 반면, 과실이 차지하는 비율은 매우 낮았다. 과일에서 탄소와 질소의 함량 모두 과실에서 가장 높았으나, 과육에서 가장 낮았다(자료 제시 않았음). 사과의 경우 질소뿐만 아니라 Ca, Mg, K, 및 P도 비슷한 경향이였다(Perring, 1984). 이러한 결과를 보면, 상당량의 영양소가 과실에 분포되어 있을 것으로 추정할 수 있지만, 과일 전체로 보았을 때 과육이 건물중에서 약 80%를 차지하는 반면 과실이 차지하는 비율은 5% 정도 밖에 되지 않아, 총량에 미치는 과육의 영향은 그리 크지 않았다고 판단하였다.

부위별 탄소저장량은 과실과 잎보다는 목질부 기관인 뿌리, 주지 및 측지에서 많았다(Table 4). 수체 내 두 주지 간 저장량의 차이는 없었고, 측지의 경우 연차별로 탄소함량의 차이는 상대적으로 적었으나(472.9-478.2g·kg⁻¹) 건물중의 연차별 차이(Table 1)로 인해 저장량은 차이가 있었다. 주간

Table 3. Numbers, fresh and dry mass of leaves and fruits of pear trees.

Parts	Amount (number·tree ⁻¹)	Fresh mass (kg·tree ⁻¹)	Dry mass (kg·tree ⁻¹)
Leaves	7,223 (1304) ^z	10.17 (2.10)	3.68 (0.36)
Fruits	62 (10.7)	51.28 (8.89)	6.73 (1.17)
Core		2.89 (0.50)	0.37 (0.06)
Flesh		43.03 (7.46)	5.33 (0.92)
Peel		5.36 (0.93)	1.03 (0.18)

^zThe values in parentheses of leaves indicate standard deviations (n = 3).

Table 4. Amounts of C and N contained in each part of pear trees.

Parts	Carbon (kg·tree ⁻¹)	Nitrogen (kg·tree ⁻¹)
Trunk	2.27 (0.23) ^z b ^y	0.02 (0.00) b
Main branches	6.43 (1.59) a	0.07 (0.03) a
Lateral branches	6.39 (1.15) a	0.09 (0.02) a
Roots	6.53 (1.72) a	0.07 (0.01) a
Leaves	1.73 (0.17) b	0.07 (0.01) a
Fruits	3.15 (0.55) b	0.03 (0.00) b

^zThe values in parentheses of leaves indicate standard deviations (n = 3).

^yMeans in the same column with different letters represent result of Duncan's multiple range test (*p* < 0.05).

을 제외한 목질부 기관의 탄소함량이 높은 편이었는데, 이는 탄소가 동화하여 저장된 기관의 저장크기를 반영한 것으로 보였다. 반면 질소함량은 탄소함량이 높았던 뿌리, 주지 및 측지뿐만 아니라, 잎에서도 매우 높았다. 밤나무의 경우, 탄소가 생장 초기에는 잎으로 가장 많이 이동하지만 과수가 생장할수록 뿌리로 가장 많이 이동하여 저장되는 것을 볼 수 있었다(Rouhier et al., 1994). 본 연구에서는 배나무의 상층부, 목질부의 질량이 가장 많았으나, 밤나무(Rouhier et al., 1994)의 경우 뿌리의 질량이 많게 나타났는데, 이는 수목별로 탄소 저장특성이 차이가 나기 때문이다(Rouhier et al., 1994). 반면 질소의 경우 잎에서도 함량이 매우 높았는데, 이는 잎에 엽록소의 함량이 높았기 때문이다(Field, 1983; Hopkins, 2008; Niinemets, 1997). Field(1983)는 잎의 위치(position)에 따라 질소함량이 차이 난다고 하였으나, 본 연구에서는 이에 대한 차이는 목적 밖이므로 측정하지 않았다. 단위 질량당 탄소와 질소의 함량 차이는 부위별로 다양하게 나타났으나, 부위별 건물중(Tables 1 and 3)의 영향으로 과수나무 한 그루가 포함하는 총 탄소와 질소의 양은 부위별로 차이가 크게 감소하였다(Table 4).

Table 5. Total C and N contents of pear orchard soils.

Depth (cm)	Total C (g·kg ⁻¹)	Total N (g·kg ⁻¹)
0 - 10	31.75 (5.25) ^z a ^y	3.41 (0.75) a
10 - 20	17.60 (1.36) b	1.66 (0.18) b
20 - 30	17.19 (2.57) b	1.64 (0.25) b
30 - 40	14.97 (2.71) bc	1.38 (0.33) bc
40 - 50	12.16 (4.87) bcd	1.10 (0.37) bc
50 - 60	9.99 (1.61) cd	0.88 (0.13) c

^zThe values in parentheses indicate standard deviations (n = 3).
^yMeans in the same column with different letters represent result of Duncan's multiple range test (p < 0.05).

Table 6. Carbon and Nitrogen stocks stored in a pear orchard.

Parts	Tree		Soil		
	Carbon (Mg·ha ⁻¹)	Nitrogen (Mg·ha ⁻¹)	Depth (cm)	Carbon (Mg·ha ⁻¹)	Nitrogen (Mg·ha ⁻¹)
Trunk	1.51 (0.15)	0.01 (0.00)	0 - 10	33.54 (6.21) ^z	3.61 (0.88)
Main branches	4.28 (1.06)	0.05 (0.02)	10 - 20 ^y	25.63 (1.71)	2.41 (0.17)
Lateral branches	4.26 (0.77)	0.06 (0.01)	20 - 30	25.04 (3.74)	2.38 (0.33)
Leaves	1.15 (0.11)	0.05 (0.01)	30 - 40	21.73 (3.05)	2.01 (0.40)
Fruits	2.10 (0.36)	0.02 (0.00)	40 - 50	17.84 (7.66)	1.61 (0.59)
Roots	4.35 (1.15)	0.05 (0.01)	50 - 60	14.52 (1.98)	1.29 (0.17)
Total	17.66 (1.97)	0.23 (0.03)		138.29 (17.17)	13.31 (1.84)

^zThe values in parentheses indicate standard deviations (n = 3).

^yBulk densities below 10 cm soil depth are assumed equal to value of bulk density at 10 - 20 cm depth.

토양 내 탄소와 질소의 함량은 모두 깊이가 깊어질수록 감소하였다(Table 5). Rouhier et al.(1994)은 토양 탄소의 동위원소분할을 분석한 결과, 12개월을 주기로 표층 탄소의 값이 밤나무 잎의 값과 비슷하게 나타나는 현상을 밝혀, 낙엽이 토양탄소의 주된 공급원임을 보여주었다. 과수나무가 갖고 있는 탄소와 질소의 함량(Table 4)과 토양단면에 저장된 탄소와 질소의 함량(Table 5)으로부터 배 과수원 내 저장되어 있는 탄소와 질소의 양(stock)을 구하였다(Table 6). 탄소와 질소의 함량은 과수나무가 토양보다 매우 높았지만, 재식 면적 내의 질량이 토양이 상대적으로 더 많았기 때문에 토양이 저장하고 있는 탄소와 질소의 총량은 더 많았다. 하지만 다년생 과수의 경우, 낙과와 낙엽의 영향으로 햇수가 지남에 따라 토양 내 탄소 및 질소의 양이 변할 수 있다. 본 연구 결과, 배 과수원에 탄소와 질소는 토양에 각각 138.29, 13.31Mg·ha⁻¹, 수체에 각각 17.66, 0.23Mg·ha⁻¹씩 저장되어 있었다. 이는 비과실수 삼림을 대상으로 조사한 평균 284Mg·ha⁻¹보다 다소 낮았다(Liao et al., 2010). 그러나 본 1차년 연구의 결과만으로 IPCC 2006 지침에 의거 Tier 3 단계에 맞춰 배 과수원이 격리하는 탄소 및 질소 함량을 제시하기에 부족하므로, 향후 2년간의 연구 결과가 뒷받침되어야 할 것이다. 최소 3년간의 연구가 필요로 하나, 본 연구에서는 그 1년차 결과를 보고하였다.

초 록

IPCC 2006 guideline에서 제시한 Tier 3 수준에 맞게 배나무 과수원의 온실가스 저장량을 산정하기 위하여, 전라남도 나주에 위치한 농촌진흥청 배시험장 재배포장(35°01'27.70 N, 126°44'53.50"E, 표고 6m)에 5.0 × 3.0m 간격으로 재식된 Y자 수형의 15년생 배 '신고(*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Niitaka)' 재배지를 대상으로 과수와 재배지 토양의 총 탄소

및 질소 저장량을 측정하였다. 이를 위해 2012년 8월, 3반복으로 과수를 굴취하여 주간, 주지, 측지, 잎, 과일, 뿌리로 분류하였고, 과수 주간으로부터 약 0.5m 떨어진 지점에서 0.6m 깊이까지 0.1m 간격으로 토양을 채취하였다. 나무 한 그루당 건물중은 주간이 4.7kg, 주지가 13.3kg, 측지가 13.9kg, 잎이 3.7kg, 과일이 6.7kg, 뿌리가 14.1kg이었다. 단위 질량당 총 탄소 및 질소의 함량은 주간에서 각 2.3kg과 0.02kg, 주지에서 6.4kg과 0.07kg, 측지에서 6.4kg과 0.09kg, 뿌리에서 6.5kg과 0.07kg, 잎에서 1.7kg과 0.07kg, 과일에서 3.2kg과 0.03kg 이었다. 재식밀도(667trees/ha)를 기준으로, 탄소와 질소는 재배지 토양에 각각 138.29 및 13.31Mg·ha⁻¹가 저장되어 있었고, 과수에 각각 17.66 및 0.23Mg·ha⁻¹씩 보유되어 있었다. 이를 종합한 결과 과수 재배지에서 탄소는 155.95Mg·ha⁻¹, 질소는 13.54Mg·ha⁻¹가 저장되어 있었다.

추가 주요어 : 탄소 저장량, IPCC 2006 guideline, 질소 저장량, 순1차생산량, *Pyrus pyrifolia*, Tier 3

인용문헌

- American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard E178-08. 2008. Standard practice for dealing with outlying observations. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Day, P.R. 1986. Particle fractionation and particle-size analysis. p. 383-403. In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, W.I.
- Field, C. 1983. Allocating leaf nitrogen for the maximization of carbon gain: Leaf age as a control on the allocation program. *Oecologia* 56:341-347.
- Fortini, P. and S. Luko. 2011. Statistical standards and ASTM, Part 4. *Qual. Eng.* 23:309-313.
- Hopkins, W.G. and N.P.A. Hüner. 2008. Introduction to plant physiology. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., Marblehead, MA, U.S.A.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan.
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2009-2011. Annual weather report. www.kma.go.kr.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS). 2010. Agricultural area survey. www.kosis.kr.
- Kozłowski, T.T. 1964. Shoot growth in woody plants. *Bot. Rev.* 30:335-392.
- Lee, J.T. 2008. Estimation of the net ecosystem productivity and net primary productivity of apple orchard in Korea, p. 1-135. In: J.T. Lee, G.Y. Kim, H.H. Kim, and H.H. Seo (eds.). Study on carbon sink agricultural sector regarding to UNFCCC. RDA, Suwon, Korea.
- Liao, C., Y. Luo, C. Fang, and B. Li. 2010. Ecosystem carbon stock influenced by plantation practice: Implications for planting forests as a measure of climate change mitigation. *PloS one* 5:e10867.
- Niinemets, Ü. 1997. Distribution patterns of foliar carbon and nitrogen as affected by tree dimensions and relative light conditions in the canopy of *Picea abies*. *Trees* 11:144-154.
- Perring, M.A. 1984. Redistribution of minerals in apple fruit during storage. Preliminary investigations with the variety spartan. *J. Sci. Food Agr.* 35:182-190.
- Rouhier, H., G. Billès, A. Kohen, M. Mousseau, and P. Bottner. 1994. Effect of elevated CO₂ on carbon and nitrogen distribution within a tree (*Castanea sativa* Mill.) - Soil system. *Plant Soil* 162:281-292.
- Rural Development Administration (RDA). 2000. Standard farming manual, pear cultivation. RDA, Suwon, Korea
- Wilson, B.F. 2000. Apical control of branch growth and angle in woody plants. *Amer. J. Bot.* 87:601-607.