

# 수변구역 조성녹지의 탄소저감 효과 및 증진방안<sup>†</sup>

조현길\* · 박혜미\*\*

\*강원대학교 조경학과 · \*\*강원대학교 대학원 조경학과

## Effects and Improvement of Carbon Reduction by Greenspace Establishment in Riparian Zones

Jo, Hyun-Kil\* · Park, Hye-Mi\*\*

\*Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University

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

### ABSTRACT

This study quantified storage and annual uptake of carbon for riparian greenspaces established in watersheds of four major rivers in South Korea and explored desirable strategies to improve carbon reduction effects of riparian greenspaces. Greenspace structure and planting technique in the 40 study sites sampled were represented by single-layered planting of small trees in low density, with stem diameter at breast height of  $6.9 \pm 0.2$  cm and planting density of  $10.4 \pm 0.8$  trees/100 m<sup>2</sup> on average. Storage and annual uptake of carbon per unit area by planted trees averaged  $8.2 \pm 0.5$  t/ha and  $1.7 \pm 0.1$  t/ha/yr, respectively, increasing as planting density got higher. Mean organic matter and carbon storage in soils were  $1.4 \pm 0.1\%$  and  $26.4 \pm 1.5$  t/ha, respectively. Planted trees and soils per ha stored the amount of carbon emitted from gasoline consumption of about 61 kL, and the trees per ha annually offset carbon emissions from gasoline use of about 3 kL. These carbon reduction effects are associated with tree growth over five years to fewer than 10 years after planting, and predicted to become much greater as the planted trees grow. This study simulated changes in annual carbon uptake by tree growth over future 30 years for typical planting models selected as different from the planting technique in the study sites. The simulation revealed that cumulative annual carbon uptake for a multilayered and grouped ecological planting model with both larger tree size and higher planting density was approximately 1.9 times greater 10 years after planting and 1.5 times greater 30 years after than that in the study sites. Strategies to improve carbon reduction effects of riparian greenspaces suggest multilayered and grouped planting mixed with relatively large trees, middle/high density planting of native species mixed with fast-growing trees, and securing the soil environment favorable for normal growth of planting tree species. The research findings are expected to be useful as practical guidelines to improve the role of a carbon uptake source, in addition to water quality conservation and wildlife inhabitation, in implementing riparian greenspace projects under the beginning stage.

*Key Words: Carbon Storage, Carbon Uptake, Greenspace Structure, Planting Technique*

<sup>†</sup>: 이 논문은 2015년 강원대학교 산림과학연구소 국제학술대회의 발표내용(Park and Jo, 2015)을 발전시킨 것임.

**Corresponding author:** Hye-Mi Park, Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea, Tel.: +82-33-250-8345, E-mail: bhm63@kangwon.ac.kr

## 국문초록

본 연구는 국내 4대강 유역에 조성된 수변녹지를 대상으로 탄소의 저장 및 연간 흡수를 계량화하고, 수변녹지의 탄소저감 효과를 증진하기 위한 조성방안을 모색하였다. 표본 선정한 40개소 연구 대상지의 녹지구조 및 식재기법은 흉고직경이 평균  $6.9 \pm 0.2\text{cm}$ 이고 식재밀도가  $10.4 \pm 0.8\text{주}/100\text{m}^2$ 로서, 소형 수목의 저밀 단층식재로 대표된다. 식재수목에 의한 단위면적당 탄소의 저장량과 연간 흡수량은 각각 평균  $8.2 \pm 0.5\text{t/ha}$ ,  $1.7 \pm 0.1\text{t/ha/년}$ 이고, 식재밀도가 높을수록 증가하는 경향을 보였다. 토양의 유기물함량과 단위면적당 탄소저장량은 각각  $1.4 \pm 0.1\%$ ,  $26.4 \pm 1.5\text{t/ha}$ 이었다. 대상지의 수목과 토양은 1ha당 약 61kL의 휘발유 소비에 상당하는 탄소량을 저장하고, 수목은 해마다 1ha당 3kL의 휘발유 소비에 기인한 탄소배출량을 상쇄하는 효과를 나타냈다. 이 탄소저감은 식재 후 5년 이상~10년 미만 성장한 효과로서 식재수목의 성장과 더불어 훨씬 더 증가할 것으로 예측된다. 연구 대상지와 상이한 식재기법의 조성모델들을 선정하여 향후 30년 동안 수목생장에 따른 연간 탄소흡수량의 변화를 비교 시뮬레이션하였다. 그 결과, 경과년도별 누적 탄소흡수량은 식재규격이 더 크고 식재밀도가 더 높은 다층 군식의 생태식재모델에서 저밀 단층식재인 대상지보다 10년 및 30년 경과시 각각 약 1.9배, 1.5배 더 많았다. 수변녹지의 탄소저감 효과를 증진하기 위해서는 규격이 상대적으로 큰 수목을 혼식하는 다층 군식, 속성수를 포함하여 연간 생장률이 양호한 자생수종의 중·고밀 식재, 식재수종의 정상적 생장에 적합한 토양조건 구비 등이 요구된다. 본 연구결과는 조성 초기단계인 수변녹지 사업에서 수질보전 및 생물서식에 부가하여 탄소흡수원의 역할을 제고하기 위한 실용적 지침이 될 것으로 기대한다.

주제어: 탄소저장, 탄소흡수, 녹지구조, 식재기법

## 1. 서론

화석연료 소비와 탄소배출에 따른 기후변화는 현재 국제적으로 거론되는 환경 관련 최대 관심사 중의 하나이다. 기후변화협약과 교토의정서는 지구 온난화에 책임있는 선진국을 대상으로 온실가스 인벤토리 및 저감정책에 관한 보고를 주기적으로 요구하고 있다. 국내에서는 저탄소 사회를 구현하고 기후변화에 대응하기 위하여 저탄소 녹색성장 기본법을 제정하였고, 이 법률에 따라 산림의 탄소흡수 기능을 확보하기 위한 탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률, 국가의 온실가스 감축목표를 달성하기 위한 온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 등을 시행하고 있다(http://www.law.go.kr). 정부는 2020년에 국가 온실가스 감축목표를 배출전망치(business as usual: BAU) 대비 30% 감축 또는 2005년 대비 4% 감축하겠다는 목표를 설정하며(www.greengrowth.go.kr), 탄소배출을 저감하기 위한 구체적 정책을 전개하는 상황이다.

대기 탄소농도의 증가는 주로 화석연료 소비와 녹지훼손에 기인한다. 수목과 토양을 포함하는 녹지는 수목의 성장과정에서 대기탄소를 흡수하고 토양의 탄소축적에 기여하므로, 기후변화의 영향을 지연 혹은 완화하는 탄소흡수원으로서 중요한 역할을 담당한다. 따라서, 녹지의 탄소저장 및 흡수능에 관한 연구가 국내외에서 도시환경(Jo and Cho, 1998; McPherson, 1998; McPherson and Simpson, 2000; Jo and Ahn, 2001; Jo, 2002; Nowak and Crane, 2002; KFRI, 2010a; Park and Kang, 2010;

Jo and Ahn, 2012; Jo *et al.*, 2013; 2014)과 산림환경(Birdsey, 1992; Milne and Brown, 1997; Song *et al.*, 1997; Kang *et al.*, 2009; KFRI, 2010b; Jo and Ahn, 2013)을 대상으로 다양한 방식에 의해 수행되어 왔다.

녹지에 의한 탄소저감 효과의 증진은 기존 수목의 정상적 생장은 물론 신규 수목식재를 필요로 한다. 환경부는 수질보전, 생물서식 등의 목적을 달성하기 위해, 1999년 한강수계를 시작으로 4대강 유역에 2011년말 기준 약 120,000ha의 면적에 이르는 수변구역을 지정하였다(http://www.me.go.kr). 이를 통해 수변녹지를 조성할 수 있는 제도적 기반을 구축하였고, 각 유역환경청에서는 수변구역의 토지를 매수하면서 녹지조성을 시작하고 있다. 수변녹지의 조성은 국내 수목식재 면적이 제한된 상황에서, 탄소흡수원을 확충할 수 있는 바람직한 기회이며 아울러 탄소배출권 확보에 일조할 수 있다. 미국의 경우 현재 약 169만ha의 수변녹지가 분포하고 있으며, 이는 매년 4.7Tg에 달하는 탄소흡수원의 역할을 제공하고 있다(Udawatta and Jose, 2011). 그러나, 국내 수변구역의 녹지조성 사업은 초기단계로서 관련 탄소저감 연구가 미진하며, 탄소저장 및 흡수 기능을 충족시킬 식재기법, 수종구성, 관리 등을 포함하는 조성기준이 부재하다.

따라서, 본 연구의 목표는 국내 4대강 유역에 조성된 수변녹지를 대상으로 탄소저장 및 흡수를 계량화하고, 수변녹지의 탄소저감 효과를 증진하기 위한 조성방안을 모색하는 것이다. 본 연구는 조성 초기단계인 수변녹지 사업에 수질보전

및 생물서식에 부가하여 탄소저감의 효과를 증진하기 위한 실용적 지침으로 활용할 수 있다. 또한, 신규 수목식재를 통해 탄소흡수원 및 탄소배출권을 확보하려는 정책에 일조할 것으로 기대한다. 본 논문에서 탄소저장량(carbon storage)은 수목이 성장하면서 다년간에 걸쳐 축적한 총량을, 탄소흡수량(carbon uptake)은 수목이 한해 동안 흡수한 양을 각각 의미한다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 대상지 선정

한강, 금강, 낙동강 및 섬진·영산강의 4대강을 대상으로 수변녹지 조성지에 대한 정보를 사전 수집한 후 예비답사를 실시하였다. 그리고, 소재지역, 조성년도, 식재밀도, 면적 등을 고려하여 유역권별 9~11개소씩 총 40개소를 조사 대상으로 최종 선정하였다(Figure 1 참조). 즉, 식재수목의 활착을 반영하여 시공 후 5년 이상의 생장기간이 경과된 조성지를 선정하되, 식재밀도가 현저히 낮거나(1~2주/100m<sup>2</sup>) 관목만 식재한 조성지는 배제하였다. 또한, 최소 3개의 식생조사 방형구를 설치할 수 있는 일정 면적 이상의 조성지를 선별하되, 지역 배분을 고려한 계층적 임의표본추출(stratified random sampling)을 통해 실사 대상지를 선정하였다.

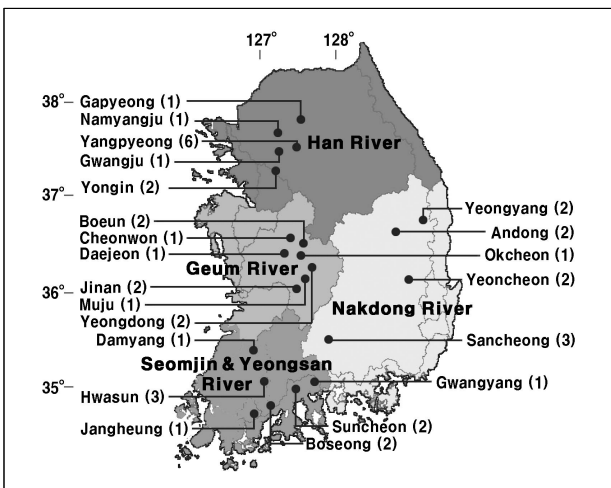


Figure 1. Location of study sites selected to survey established riparian greenspace

\* Figures in parenthesis: Number of study sites

### 2. 조사 및 분석

2014년 여름~가을에 선정 대상지를 현장 답사하여, 면적, 성장환경, 녹지구조, 식재기법, 성장상태 등을 포함하는 수변녹

지 조성현황을 조사하였다. 대상지별로 체계적 임의표본추출(systematic random sampling)에 의해 크기 10×10m의 방형조사구를 3개소씩 설치하였다. 성장환경 조사는 경사, 방위, 토양, 하층광량 등을 포함하였다. 토양은 각 조사구의 중앙부에서, 직경 5.1cm의 토양표본추출기(AMS, Idaho)를 이용하여 지피물을 제거하고 깊이 30cm까지의 표토를 채취하였다. 대상지별 3개씩 총 120개의 토양표본을 채취하여 KIAST(2000)의 토양분석방법에 따라 식재지반의 이화화성을 분석하였다. 하층광량은 광량센서(LI-COR, Nebraska)를 사용하여 조사구별 5반복으로 측정하였다. 녹지구조는 조사구별 모든 식재수목을 대상으로 수종조사와 함께 흉고직경, 수관폭 및 수고를 측정하고, 종구성, 밀도, 피도, 규격 등 수변녹지 조성의 구조적 특성을 정량 분석하였다. 또한, 다층 또는 단층, 군식 또는 단식 등의 수직 및 수평적 배식 관련 식재기법을 조사하였다. 성장상태는 수목고사, 덩굴식물의 수목피압 등에 초점을 두어 현장 파악하였다.

### 3. 탄소저장 및 흡수량 산정

대상지 수목의 탄소저장 및 흡수량은 개발된 수종별 계량모델(Table 1 참조)을 각 수목개체에 적용하여 산정하였다. 계량모델을 구할 수 없는 일부 수종의 경우는 동일 속(genus) 또는 그룹(활엽수와 침엽수)의 산정식들을 대용하여 평균치를 산출하였다. 수목 개체별 산정치는 합산하여 수변녹지 조성지의 단위면적당 평균 탄소저장 및 흡수량을 구하였다. 토양의 탄소저장량은 상기와 같이 채취한 깊이 30cm의 120개 표본을 대상으로 KIAST(2000)의 방법에 의해 유기탄소함량을 분석하고, KFRI(2007)의 산정법을 적용하여 면적단위로 환산하였다.

Table 1. Regression model sources used to calculate carbon storage and uptake of major tree species in study sites

Species	Diameter range* (cm)	Reference
<i>Acer</i> spp.	4.9~19.6	Jo and Ahn(2012)
<i>Chionanthus retusa</i>	3.1~10.5	Jo et al.(2014)
<i>Cornus officinalis</i>	2.8~15.2	"
<i>Ginkgo biloba</i>	5.0~25.0	Jo and Ahn(2012)
<i>Pinus densiflora</i>	5.3~24.6	Jo et al.(2013)
<i>Pinus koraiensis</i>	5.3~30.9	"
<i>Prunus armeniaca</i>	3.6~14.3	Jo et al.(2014)
<i>Prunus yedoensis</i>	4.8~23.0	Jo and Ahn(2012)
<i>Quercus</i> spp.	6.0~42.0	Jo and Ahn(2000)
<i>Zelkova serrata</i>	5.1~28.0	Jo and Ahn(2012)

\* Stem diameter at ground level for *C. officinalis* and diameter at breast height of 1.2m (dbh) for the other species

#### 4. 탄소흡수량 변화 시뮬레이션

대상지 식재수목이 향후 30년 동안 성장하면서 흡수 가능한 탄소흡수량의 변화를 상기한 수종별 계량모델에 연간 흉고직경 성장률을 대입하여 시뮬레이션하였다. 연간 흉고직경 성장률은 기존의 다수 연구(Jo and Ahn, 2000; 2012; Jo *et al.*, 2013; 2014)에 근거하여 활엽수 평균 0.67cm(n=888)와 침엽수 0.65cm(n=1,223)를 적용하였다. 한편, 환경부 수생태복원사업단(CAER, 2014)은 최근 4대강 유역의 자연수변림 구조를 실시하여 47개 군락유형의 생태식재모델을 개발하고 수변구역에 적용 필요한 수변녹지 조성지침을 수립한 바 있다. 본 연구는 수변녹지의 탄소저감 효과를 증진할 바람직한 조성방안을 모색하기 위해, 환경부의 군락유형별 생태식재모델을 대상으로 동일한 방법에 의해 탄소흡수량 변화를 시뮬레이션하였다. 그리고, 본 연구의 대상지(40개소)와 환경부의 생태식재모델(47개 군락유형) 간 녹지구조 및 식재기법에 따른 평균 탄소흡수량의 차이를 비교하였다. 환경부의 생태식재모델은 목표수종, 종구성, 식재밀도, 식재규격 등을 포함하였다. 식재규격은 성숙한 자연수변림의 평균 흉고직경 및 수령 등을 반영하여, 수변녹지 조성 후 자연수변림에 근접한 수목 크기에 도달하는데 요구되는 기간에 준하여 결정하였다. 즉, 조기 달성을 추구하는 10년 목표의 단기형, 조성 대상지의 식재규격을 반영하는 20년 목표의 중기형, 소형 수목을 식재하여 조성비용 절약을 추구하는 30년 목표의 장기형으로 구분하여 시뮬레이션하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 대상지 생장환경

수변녹지 조성지의 면적은 대상지에 따라 500~11,400m<sup>2</sup> 범위로서 평균 2,990±212m<sup>2</sup>이었고, 4,000m<sup>2</sup> 미만이 전체의 약 80%를 차지하였다. 지형은 평지가 67%로서 가장 많았고, 평지를 제외한 사면 경사는 평균 11.3±0.9%이고 최대 27%로서 비교적 완만하였다. 사면 방위는 동향과 서향이 각각 27.5%, 남향 22.5%, 북향 15.0% 등을 점유하였다. 녹지 내부 초본 높이의 하층광량비는 평균적으로 외부 광량의 86.9±1.2%로서 상당히 높았다. 이는 식재수목의 밀도와 피도가 그 만큼 낮다는 것

을 시사한다. 토성은 대개 사양토(68%) 내지 양질사토(23%)로서, pH는 평균 5.8±0.1이고 유기물함량과 양이온치환능은 각각 1.4±0.1%, 5.9±0.2cmol<sup>+</sup>/kg이었다(Table 2 참조). 국내 자연수변림의 토양은 pH 4.9, 유기물 6.3%, 전질소 0.32%, 양이온치환능 14.7cmol<sup>+</sup>/kg 등이었다(CAER, 2014). 이와 비교하면, 대상지 토양의 유기물함량을 비롯한 전질소 및 양이온치환능이 현저하게 낮은 것으로 분석된다. 조정설계기준(KILA, 2013)에서 제시하는 토양의 항목별 평가등급에 준하면, 대상지 토양은 pH가 중급에 해당하나 이를 제외한 대부분의 항목이 하급에 해당하였다. 불량한 토양환경은 식재수목의 정상적 성장을 저해하여, 탄소저감을 비롯한 수질보전, 생물서식 등 수변녹지의 다양한 기능을 제한할 수 있다.

#### 2. 녹지구조 및 식재기법

대상지에 식재한 개소당 수종수는 평균 5.6±0.5종이고 총 수종수는 49종이었다. 상대밀도가 3.0% 이상인 상위 10개 수종은 상수리나무(*Quercus acutissima*, 상대밀도 12.9%), 복자기(*Acer triflorum*, 9.4%), 벚나무류(*Prunus* spp., 8.4%), 이팝나무(*Chionanthus retusus*, 6.6%), 당단풍(*A. pseudosieboldianum*, 5.3%), 느티나무(*Zelkova serrata*, 5.2%), 갈참나무(*Q. aliena*, 4.7%), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*, 3.4%), 느릅나무(*Ulmus davidiana* var. *japonica*, 3.4%) 및 산수유(*Cornus officinalis*, 3.3%)이었다. 식재밀도는 평균 10.4±0.8주/100m<sup>2</sup>로서, 국내 자연수변림의 평균치(CAER, 2014)인 16주/100m<sup>2</sup>(상층 7주, 중층 9주)의 2/3 수준이었다. 식재밀도의 대상지 분포비는 100m<sup>2</sup>당 5~10주가 50%로서 가장 높았고, 이어서 10~15주 28%, 15~20주 12%, 5주 미만 및 20주 이상 각각 5% 등의 순이었다(Figure 2 참조). 수목피도는 평균 34.3±2.1%로서, 녹지공간의 약 66%가 수관 부채로 전기한 바와 같이 녹지 내부의 하층광량비가 높았다. 수목의 평균 크기는 흉고직경 6.9±0.2cm, 수관폭 2.2±0.1m, 수고 4.9±0.1m 등이었다. 흉고직경 구조를 분석한 결과(Figure 3 참조), 3~6cm인 수목이 전체의 44%로서 가장 높은 점유비를 나타냈다. 다음으로 6~9cm 31%, 9~12cm 19% 등의 순이었고, 3cm 미만과 12cm 이상이 각각 3%를 차지하였다. 이와 같이, 수변녹지 조성은 저밀 및 소형 수목 위주의 식재로 대표된다. 이는 식재비용 절약에 유리하지만, 덩굴식

Table 2. Physical and chemical characteristics of soils in study sites\*

Major soil texture	pH	OM (%)	TN (%)	Ava. P (mg/kg)	EC (cmol <sup>+</sup> /kg)			CEC (cmol <sup>+</sup> /kg)
					K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
Sandy loam, Loamy sand	5.8 (0.1)	1.4 (0.1)	0.06 (0.00)	89.1 (11.0)	0.47 (0.03)	2.12 (0.13)	0.87 (0.04)	5.9 (0.2)

\* Figures in parenthesis: Standard error, OM: Organic matter, TN: Total nitrogen, Ava. P: Available P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, EC: Exchangeable cation, CEC: Cation exchange capacity

물을 포함한 호광성 초본의 유입을 조정하여 수관피압, 양분경합 등을 야기하고, 탄소저장을 비롯한 수변녹지의 기능을 조기에 확보하는데 취약할 수 있다.

수변녹지의 수직구조는 전체 대상지의 약 82%가 상층만 식재한 단층구조이고, 상, 중 및 하층으로 구성된 다층식재는 전무하였다(Figure 4 참조). 수종의 수평분포는 단일종을 식재하거나 수종별로 공간 분리하여 동일종만 식재한 경우가 전체의 58%로서 혼식한 경우보다 더욱 많았다. 식재수목의 규모도 거의 유사한 단령구조이었다. 자연수변림은 흔히 수직적으로 상,

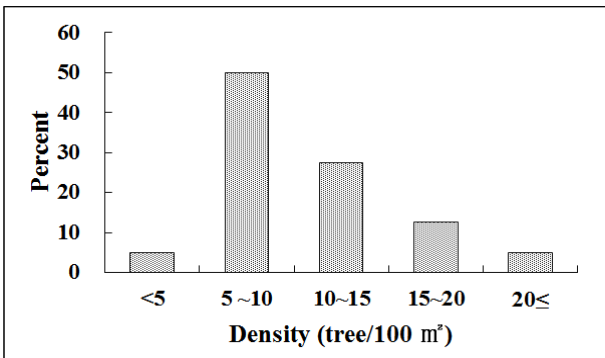


Figure 2. Density distribution of trees planted in study sites

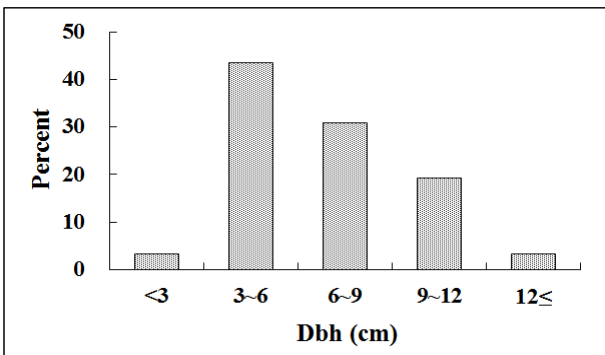


Figure 3. Dbh distribution of trees planted in study sites

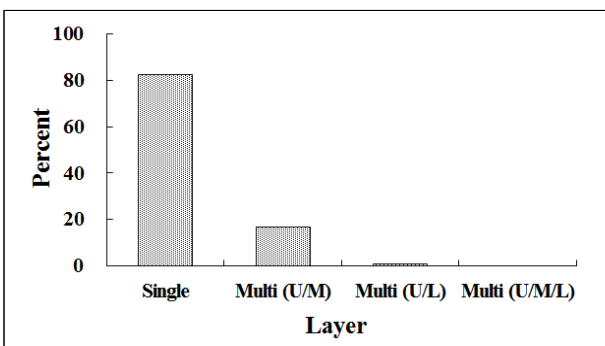


Figure 4. Vertical structures of tree plantings in study sites\*  
 \* U/M: Upper and middle layer, U/L: Upper and lower layer, U/M/L: Upper, middle, and lower layer

중 및 하층의 다층구조를 형성하면서, 수평적으로 우점종, 우세종, 동반종 등으로 구성된 다수의 수종이 함께 성장하고 있다(CAER, 2014). 그리고, 그들의 수령도 유목에서부터 성목까지 다양하게 분포하는 다령구조이다. 이에 반해, 대상지의 식재기법은 유사 규모의 단일종 내지 소수종의 단층식재로 대표된다.

대상지의 총 식재개체 중 약 11%가 고사한 것으로 나타났다. 고사율이 가장 높은 수종은 메타세콰이어(*Metasequoia glyptostroboides*, 26%), 갈참나무(24%), 층층나무(*Cornus controversa*, 21%) 등이었다. 이들은 건조한 토양에서 성장 불량한 수종으로서(KEC, 2006) 식재시 토양수분 조건을 구비할 필요가 있다. 한편, 이팝나무(*Chionanthus retusus*), 팔배나무(*Sorbus alnifolia*), 신나무(*A. ginnala*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 졸참나무(*Q. serrata*) 등은 고사개체가 발생하지 않은 수종이었다. 관리는 주로 유입초본 제거와 고사목 벌목으로서, 대상지 전체의 약 70%는 초본 제거를 위한 풀베기 작업을, 20%는 고사목 벌목을 실시하는 것으로 조사되었다. 그러나, 전체의 약 20%는 관리흔적을 발견할 수 없었으며, 일부 대상지는 환삼덩굴(*Humulus japonicus*), 칩(*Pueraria lobata*), 돌콩(*Glycine soja*) 등의 덩굴식물에 의해 식재수목이 피압되어 정상적인 생장이 불가능한 상황이었다. 매년 풀베기 관련 관리요구를 감안하면, 적절한 중·고밀의 식재에 부가하여 식재초기에 우드칩 등으로 지표면을 멀칭하여 초본 및 위해식물의 유입을 제어함이 바람직하다.

### 3. 탄소저장 및 흡수

대상지 식재수목의 단위면적당 탄소저장량은 최소 1.5~최대 27.3t/ha로서 평균 8.2±0.5t/ha이었고, 탄소흡수량은 최소 0.2~최대 5.1t/ha/년으로서 평균 1.7±0.1t/ha/년이었다(Table 3 참조). 대상지의 탄소저장 및 흡수량은 식재밀도가 높을수록 증가하는 경향을 보였다. 즉, 식재밀도가 5~10주/100m<sup>2</sup>에서 최소 2배인 15~20주/100m<sup>2</sup>로 증가하면, 탄소저장량은 약 1.5배, 탄소흡수량은 2.0배 더 많았다. 식재밀도가 20주/100m<sup>2</sup> 이상인 대상지의 탄소저장량은 15~20주/100m<sup>2</sup>인 경우의 11.2±1.8t/ha보다 약간 적었는데, 이는 식재수목 크기가 상대적으로 작기 때문인 것으로 나타났다. 국내 중부지역의 관련 연구결과(Jo, 2002; Jo and Ahn, 2013)와 비교하면, 탄소저장량은 산림지에서 춘천 26.0±2.7~서울 60.1±5.7t/ha이고, 산림 및 농경지를 제외한 도심지의 경우 4.7±0.7~7.2±1.3t/ha이었다. 그리고, 탄소흡수량은 산림지에서 강릉 1.6±0.1~용인 5.7±0.6t/ha/년이고, 도심지에서 춘천 0.6±0.1~서울 0.8±0.1t/ha/년이었다. 대상지의 평균 탄소저장 및 흡수량은 수목 밀도와 규모의 차이에 기인하여, 산림지의 경우보다 훨씬 적은 반면 도심지의 경우보다는 많았다.

Table 3. Carbon storage and uptake by tree density in study sites (mean ± standard error)\*

Carbon		Tree density (tree/100 m <sup>2</sup> )					Mean
		<5	5~10	10~15	15~20	20≤	
Trees	Storage (t/ha)	5.0 ± 0.4	7.3 ± 0.7	8.2 ± 0.9	11.2 ± 1.8	10.2 ± 1.6	8.2 ± 0.5
	Uptake (t/ha/yr)	0.9 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.5 ± 0.1	2.4 ± 0.3	3.3 ± 0.3	1.7 ± 0.1
Soils	Storage (t/ha)	23.5 ± 4.4	27.2 ± 2.3	27.8 ± 3.0	22.3 ± 3.0	20.8 ± 3.0	26.4 ± 1.5

\* Mean dbh: 6.9 cm

대상지 토양의 단위면적당 탄소저장량은 최소 7.3~최대 63.8t/ha로서 평균 26.4±1.5t/ha이었다(Table 3 참조). 기존 연구에 의하면, 토양의 탄소저장량은 용인 II영급 산림지에서 평균 54.7t/ha이고(Jo and Ahn, 2013), 춘천 도심지에서 16.2t/ha이었다(Jo, 2002). 대상지 토양의 탄소저장량은 유기물함량과 유관하게 전자의 48%에 불과하나 후자보다는 약 1.6배 더 많았다. 즉, 토양의 유기물함량은 용인 산림지에서 2.0%이고(Jo and Ahn, 2013) 춘천 도심지에서 0.6%이었다(Jo, 2002). 한편, 용인 산림지 토양의 탄소저장량은 토심 60cm까지를 포함하나 본 연구의 경우는 30cm 깊이의 분석치로서, 표층에서 심층보다 더 많은 탄소를 저장하더라도(Jo, 2002; Lee *et al.*, 2010) 토심 차이를 감안한 해석을 요구한다. 대상지는 식재초기로서 근계가 대부분 표층에 분포하고, 성토를 제외한 심층의 토양경도가 높아 토양표본추출기를 가동하는데 한계가 있었다. 본 연구는 리터폴(litterfall)의 유입과 분해 관련 토양의 연간 탄소유동은 고려하지 않았다. 중부지역 산림지 토양의 경우 분해에 따른 탄소유출량을 제감한 연간 탄소축적량은 약 1.3t/ha인 것으로 추정된다(Jo, 1999). 향후, 식재수목의 생장에 따른 토양의 탄소유입 및 유출을 모니터링할 필요가 있다.

휘발유 1L 소비는 약 0.57kg의 탄소를 대기에 배출하는데(www.climateinsight.or.kr), 대상지의 수목과 토양은 1ha당 약 61kL의 휘발유 소비에 상당하는 탄소량을 저장하고 있는 셈이었다. 그리고, 수목은 해마다 1ha당 3kL의 휘발유 소비에 기인한 탄소배출량을 상쇄하는 것으로 나타났다. 대상지 수목의 단위면적당 탄소흡수량을 환경부에서 지정한 수변구역 전체에 적용할 경우, 수변녹지 조성은 해마다 204kt의 탄소를 흡수할 잠재력을 보유하고 있다. 국내 승용차 1대의 탄소배출량은 0.7t/년인데(KFRI, 2012), 수변구역의 녹지조성은 승용차 약 292,000대의 탄소배출량을 해마다 상쇄하는 탄소흡수원으로서의 중요한 역할을 담당할 수 있다. 이는 식재 후 5년 이상~10년 미만 성장한 대상지 수목에 기초한 효과로서, 연간 탄소흡수 효과는 식재수목의 성장과 더불어 더 증가할 것이다.

4. 탄소흡수 변화 및 비교

본 연구의 대상지와 환경부(CAER, 2014)의 생태식재모델

간 식재수목이 향후 30년 동안 성장하면서 흡수 가능한 탄소량의 변화를 비교 시뮬레이션한 결과, 대상지의 10년 경과시 누적 탄소흡수량은 약 36.0t/ha이고, 생태식재모델의 경우는 목표년도별로 단기형 66.6t/ha, 중기형 52.4t/ha, 장기형 46.3t/ha 등이었다(Figure 5 참조). 즉, 연구 대상지의 탄소흡수 효과가 가장 낮은 반면 생태식재모델 단기형의 경우가 가장 높았는데, 이 단기형의 탄소흡수량은 연구 대상지보다 약 1.9배 많았다. 20년 및 30년 경과시에도 연구 대상지의 누적 탄소흡수량은 각각 111.8t/ha 및 239.5t/ha로서, 생태식재모델 단기형의 61~66%, 중기형 및 장기형의 69~87%에 불과하였다. 생태식재모델의 30년 경과시 누적 탄소흡수량은 단기형 362.3t/ha, 중기형 283.1t/ha, 장기형 276.0t/ha 등으로서, 단기형은 중기형이나 장기형보다 약 1.3배 더 큰 탄소흡수 효과를 나타냈다.

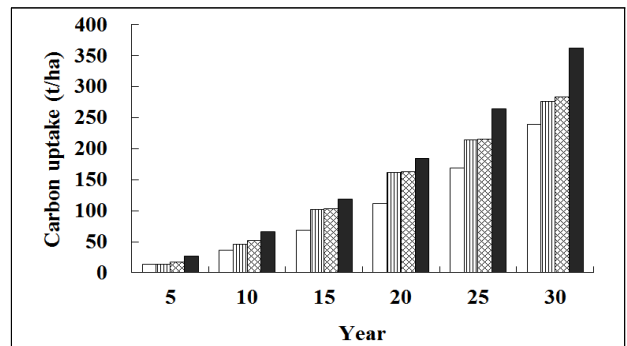


Figure 5. Simulation of carbon uptake changes by tree growth between study sites and ecological planting models(EPM)\*  
 Legend: □ Study sites, ▨ EPM-long term, ▩ EPM-middle term, ■ EPM-short term  
 \* Short, middle, and long term for EPM(CAER, 2014): Mature period of 10, 20, and 30 years, respectively (the same with Figure 6)

본 연구 대상지의 수목 식재기법은 전기한 바와 같이 단일종 내지 소수종의 저밀 단층식재로 대표된다. 한편, 환경부(CAER, 2014)의 생태식재모델은 자연수변림의 다층 군식을 반영하는 구조로서, 소나무-느티나무군락, 졸참나무-느릅나무군락, 신나무-버드나무군락 등 총 47개의 군락유형으로 분류된다. 군락유형별 수목 식재밀도는 연구 대상지보다 평균 약 1.6배 높고, 식재 목표수종의 수는 연구 대상지보다 약 1.8배 많은 9.9종이었

다. 식재규격은 흉고직경의 경우 성숙 목표년도에 따라 단기형 평균 11cm, 중기형 5cm, 장기형 3cm 등이고, 중기형의 식재규격은 연구 대상지의 평균치와 가장 유사한 것이었다. 또한, 생태식재모델은 목표수종에 부가하여 식재효과를 조기에 달성하기 위한 임시 수종으로서 포플러류, 버드나무류 등 속성수의 식재를 제안하였다. 근락유형별 총 식재개체 중 속성수의 평균 비율은 단기형 18%(흉고직경 7cm), 중기형 58%(2.5cm), 장기형 71%(2cm) 등이었다. 이와 같이, 녹지구조 및 식재기법의 차이(Figure 6 참조)는 탄소흡수량의 고저를 좌우하였다. 특히, 식재규격이 크면 작은 경우보다, 그리고 유사 식재규격이라도 식재밀도가 높으면 낮은 경우보다 경과년수에 따른 누적 탄소흡수량이 더 많은 것으로 나타났다.

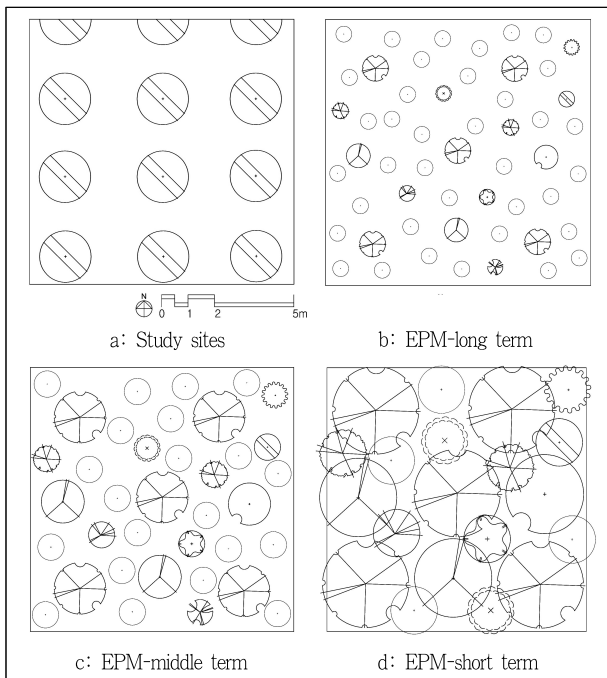


Figure 6. Typical plan view examples of tree plantings for study sites and EPM

\* ○: Fast-growing trees

## 5. 수변녹지 조성방안

본 연구에 근거하면, 녹지의 탄소저장 및 흡수를 좌우하는 주요 결정요소는 수목의 규격과 밀도를 포함하는 식재기법이다. 즉, 수변녹지의 탄소저감 효과를 증진하기 위해서는 소형 수목을 저밀도로 분산시키는 다층 단식을 회피하고, 상대적으로 밀도 높은 다층 군식의 식재기법을 적용하여 단위면적당 생체량을 증가시켜야 한다. 규격이 큰 수목의 고밀식재는 식재효과를 조기에 확보하고 식재 초기 수목생장을 위해하는 호광성 식물종의 유입을 제한하는데도 유리한 한편, 소형 수목의 저밀

식재보다 더 많은 식재예산을 요구할 수 있다. 다층 군식은 상층 수목 하부에 규격이 상대적으로 작은 소형 및 중형 수목을 혼식하므로, 식재공간 낭비를 제어하고 대형 수목만의 식재에 따른 요구비용을 절감할 수 있다. 또한, 이러한 식재기법은 수직적 다양성과 다령구조를 확보하여 탄소저감 이외에 수변녹지의 수질보전 및 생물서식 기능(Binford and Karty, 2006; Noss, 2006)도 증진할 수 있다.

식재 목표수종은 조성 대상지의 토양, 기후 등 성장환경 하에서 연간 생장률이 양호할 자생종(CAER, 2014)을 선정하되, 포플러류, 버드나무류 등의 속성수종을 함께 식재해야 한다. 수변녹지 조성은 다양한 식재종으로 생물 다양성, 경관 다양성 등도 확보함이 바람직하나, 탄소흡수만을 고려할 경우 침엽수보다는 연간 생장률이 더 큰 활엽수 위주의 식재가 적합하다(Jo and Ahn, 2000; 2013). 속성수는 목표수종이 성숙할 때까지의 임시수목으로서 식재의 조기효과와 단위면적당 탄소흡수를 증진하는데 필요하다. 속성수 식재밀도는 목표수종 사이 빈공간을 채우도록 식재 후 수관생장 변화를 예측하여 결정하되, 목표수종의 생장에 따른 수관공간을 확보해야 할 시기에 속성수를 단계적으로 간벌한다. 속성수 간벌목은 우드칩 멀칭재로 활용하여 유기물 공급, 위해식물 유입제어 등은 물론 토양의 탄소저장을 도모할 수 있다. 한편, 불량한 식재지반은 수목고사 원인 중의 하나이므로 사전에 식재수종의 성장조건에 부합하는 토양의 이화학성을 구비하여, 수목의 정상적 생장을 유도하고 탄소흡수 기능을 제고할 필요가 있다.

## IV. 결론

탄소저감은 화석연료 절약, 대체에너지 개발, 녹지조성과 보전 등을 통해 가능하지만, 녹지조성은 대체에너지 개발보다 시간과 비용의 절약 측면에서 더욱 효율적이라고 판단된다. 환경부가 지정한 수변구역은 제한된 국토공간 내에서 상당한 규모의 녹지를 조성할 수 있는 잠재공간으로서, 수질보전과 생물서식의 효과에 부가하여 탄소흡수원 및 탄소배출권의 확보에 크게 기여할 수 있다. 그러나, 수변구역의 녹지조성은 초기단계로서 이 사업에 따른 탄소저감 효과가 어느 정도인지, 탄소저장 및 흡수 기능을 충족시키기 위해 어떻게 조성해야 하는지 관련 연구가 부재하는 상황이다. 따라서, 본 연구는 국내 4대강 유역에 조성된 수변녹지를 대상으로 탄소저장 및 흡수를 계량화하고, 수변녹지의 탄소저감 효과를 증진하기 위한 조성방안을 모색하였다.

대상지의 녹지구조 및 식재기법은 흉고직경이 평균  $6.9 \pm 0.2$ cm 이고, 식재밀도가  $10.4 \pm 0.8$ 주/100m<sup>2</sup>로서 소형 수목의 저밀 다층 식재로 대표된다. 식재수목의 단위면적당 탄소저장 및 흡수량은 각각 평균  $8.2 \pm 0.5$ t/ha,  $1.7 \pm 0.1$ t/ha/년이었다. 대상지에 따

라 식재밀도가 2배 증가하면 탄소저장량은 최소 약 1.5배, 탄소흡수량은 2.0배 더 많았다. 토양의 유기물함량과 단위면적당 탄소저장량은 각각  $1.4 \pm 0.1\%$ ,  $26.4 \pm 1.5t/ha$ 이었다. 대상지의 수목과 토양은 1ha당 약 61kL의 휘발유 소비에 상당하는 탄소량을 저장하고, 수목은 해마다 1ha당 3kL의 휘발유 소비에 기인한 탄소배출량을 상쇄하는 것으로 나타났다. 수목의 단위면적당 탄소흡수량을 수변구역 전체에 적용할 경우, 수변녹지 조성은 승용차 약 292,000대의 탄소배출량에 해당하는 204kt의 탄소를 해마다 흡수할 탄소흡수원으로서의 잠재력을 보유한다. 이는 식재 후 5년 이상~10년 미만 생장한 대상지 수목에 기초한 효과로서, 수목의 생장에 따른 탄소흡수량은 현재 대비 10년 후 약 2.9배, 20년 후 5.6배, 30년 후 8.6배 증가할 것으로 예측된다.

본 연구의 대상지외는 상이한 식재기법의 조성모델을 선정하여 향후 30년 동안 수목생장에 따른 탄소흡수량의 변화를 비교 시뮬레이션한 결과, 경과년도별 누적 탄소흡수량은 저밀 단층식재인 연구 대상지에서 가장 적었다. 반면, 식재규격이 더 크고 식재밀도가 더 높은 다층 군식의 생태식재모델이 가장 많은 누적 탄소흡수량을 보였다. 수변녹지의 탄소저감 효과를 증진하기 위해서는 규격이 상대적으로 큰 수목을 혼식하는 다층 군식, 속성수를 포함하여 연간 생장률이 양호한 자생수종의 중·고밀 식재, 식재수종의 정상적 생장에 적합한 토양조건 구비 등이 요구된다.

본 연구의 의의는 수변녹지 조성지의 탄소저감 효과를 계량화하고, 그 효과를 증진하기 위한 조성방안을 모색한 초석연구라는 점에 있다. 본 연구에서는 토양의 리터폴 유입과 분해 관련 연간 탄소고정은 고려하지 않았다. 향후, 식재수목의 생장에 따른 토양의 탄소유입 및 유출을 계량화하여 해당 정보를 구축할 필요가 있다. 탄소흡수원과 탄소배출권의 확보에 대한 사회적 관심에 즈음하여, 본 연구결과가 수변녹지의 관련 역할을 홍보하고 바람직한 조성사업을 유도하는데 일조하길 기대한다.

## References

- Binford, M. W. and R. J. Karty(2006) Riparian greenways and water resources. In P. C. Hellmund and D. S. Smith, eds., *Designing Greenways*, Washington, D.C.: Island Press, pp. 108-157.
- 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.
- CAER(Center for Aquatic Ecosystem Restoration)(2014) *Development of Technology to Establish Riparian Greenspace and Eco-belt*. Ministry of Environment.
- Jo, H. K.(1999) 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.
- Jo, H. K.(2002) Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management* 64: 115-126.
- Jo, H. K. and D. H. Cho(1998) Annual CO<sub>2</sub> uptake by urban popular landscape tree species. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 26(2): 38-53.
- Jo, H. K., J. Y. Kim, and H. M. Park(2013) 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.
- Jo, H. K., J. Y. Kim, and H. M. Park(2014) Carbon reduction effects of urban landscape trees and development of quantitative models - for five native species. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 42(5): 13-21.
- 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.
- Jo, H. K. and T. W. Ahn(2001) Role of atmospheric purification by trees in urban ecosystem - in the case of Yongin. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 29(3): 38-45.
- 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.
- Jo, H. K. and T. W. Ahn(2013) Evaluation CO<sub>2</sub> storage and uptake by forest landscapes in the middle region of Korea. *Journal of Environmental Science International* 22(2): 139-149.
- 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 Gongju, Chungnam province. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 12(6): 143-152.
- KEC(Korea Expressway Corporation)(2006) *Illustrated Book for Landscape Plants*. Seoul.
- KFRI(Korea Forest Research Institute)(2007) *Survey Manual for Forest Biomass and Soil Carbon*. Seoul.
- KFRI(Korea Forest Research Institute)(2010a) *Greenhouse Gas Inventory of Urban Green Areas - in Case of Seoul Metropolis*. Research Report 10-19.
- KFRI(Korea Forest Research Institute)(2010b) *Carbon Emission Coefficients of Major Tree Species to Inventory Greenhouse Gases from Forests*. Research Report 10-25.
- KFRI(Korea Forest Research Institute)(2012) *Carbon Uptake of Major Tree Species in Korea*. Research Report 14-15.
- KIAST(Korean Institute of Agricultural Science and Technology)(2000) *Methods of Analysis for Soil and Plants*. Suwon.
- KILA(Korean Institute of Landscape Architecture)(2013) *Landscape Design Standards*. Seoul.
- Lee, S. W., J. K. Byun, and S. H. Kim(2010) Carbon storage in forest floors and mineral soils, Korea. *Proceedings of Korean Forest Society Conference*. pp. 230-232.
- McPherson, E. G.(1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24(4): 215-223.
- 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.
- Milne, R. and T. A. Brown(1997) Carbon in the vegetation and soils of Great Britain. *Journal of Environmental Management* 49: 413-433.
- Noss, R. F.(2006) Greenways as wildlife corridors. In P. C. Hellmund and D. S. Smith, eds., *Designing Greenways*. Washington, D.C.: Island Press, pp. 70-107.
- Nowak, D. J. and D. E. Crane(2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution* 116: 381-389.
- Park, E. J. and K. Y. Kang(2010) Estimation of C storage and annual



- CO<sub>2</sub> uptake by street trees in Gyeonggi-do, Korean Journal of Environment and Ecology 24(5): 591-600.
28. Park, H. M. and H. K. Jo(2015) Carbon reduction effects of riparian greenspace projects in Korea and desirable ecological approach, Proceedings of International Symposium on Ecological Landscaping and Green Leisure, Kangwon National University, Institute of Forest Science, pp. 143-143.
29. 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.
30. Udawatta, R. P. and S. Jose(2011) Carbon sequestration potential of agroforestry practices in temperate North America, In B. M. Kumar and P. K. R. Nair, eds., Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems: Opportunities and Challenges, Dordrecht: Springer-Verlag, pp. 17-42.
31. <http://www.climateinsight.or.kr>
32. <http://www.greengrowth.go.kr>
33. <http://www.law.go.kr>
34. <http://www.me.go.kr>

---

Received : 21 October, 2015

Revised : 17 November, 2015 (1st)

Accepted : 17 November, 2015

3인익명 심사필