

탄소 저장량을 이용한 국내 주요 생태계 기후 조절 서비스 지표 산정

김지수 · 한승현 · 장한나 · 김태연 · 장인영¹ · 오우석² · 서창완¹ · 이우균 · 손요환*

고려대학교 환경생태공학과, ¹국립생태원 생태연구본부 융합연구실

²국립생태원 생태조사평가본부 생태조사연구실

Quantitative Assessment of Climate Regulating Ecosystem Services Using Carbon Storage in Major Korean Ecosystems

Jisoo Kim, Seung Hyun Han, Hanna Chang, Teayeon Kim, Inyoung Jang¹, Wooseok Oh²,
Changwan Seo¹, Woo-Kyun Lee and Yowhan Son*

*Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University,
Seoul 02841, Korea*

¹*Division of Ecological Services and Research Planning, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea*

²*Division of Ecological Monitoring, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea*

Abstract - Ecosystems have functions of providing, supporting, regulating and cultural services. In particular, there is an increasing attention to the importance of regulating ecosystem services in carbon sequestration function, since it is closely related to the issue of climate change. In this study, to quantify benefits of climate regulating ecosystem services, the carbon storage was defined as an indicator. Nine major Korean ecosystems were classified and research papers on carbon storage were analyzed. The collected carbon storage data were categorized according to classified ecosystems, methodologies, and carbon storage components. For each category, the mean, standard error and coefficient of variation were calculated. The carbon storage indicator was highest in vegetation biomass of deciduous forest ecosystems. The uncertainty was also estimated by the IPCC 2006 guidelines. The estimations of the uncertainty differed by methodologies and carbon storage components. With exception of forest ecosystems, the limited number of studies were available which might have hindered to conduct accurate estimations. These findings indicate that there are needs for further clarification in the measurement standards by different ecosystems.

Key words : carbon storage, climate regulating ecosystem services, ecosystem service indicator, indicator development

서 론

생태계 서비스란 인간이 생태계로부터 얻는 편익을 의미하며 크게 공급, 조절, 지지, 문화 서비스 등 4가지 범주로 구

분된다(Millennium Ecosystem Assessment 2005). 생태계에 대한 서비스 개념의 도입으로 국내에서도 최근 다양한 분야에서 생태계 서비스의 정의, 기능 분류, 경제적 가치 평가 등에 대한 관심이 높아지고 있으며(Koo *et al.* 2012; Jeon *et al.* 2013; Ahn and Bae 2014; Choi *et al.* 2014; Song *et al.* 2015), 이에 따라 자연생태계가 제공하는 서비스 기능의 가치 평가

* Corresponding author: Yowhan Son, Tel. 02-3290-3015,
Fax. 02-3290-3651, E-mail. yson@korea.ac.kr

작업도 필요하다. 한편 기후 조절 서비스에 관한 연구는 기후 변화가 이슈화됨에 따라 그 중요성이 더욱 부각되고 있으며, 특히 최근에는 온실가스 조절을 위한 생태계의 탄소 저장 및 흡수 기능에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다(Schimel *et al.* 2000; Lorenz 2013; Choi *et al.* 2014). 그런데 자연생태계가 제공하는 서비스 기능의 가치 평가를 위해서는 정량화 작업이 필요하며, 현재 생태계 서비스 측정에는 모델링, 지표/지수 접근법, 가치추정법 등이 개발되어 사용되고 있다. 이 중 지표접근법은 생태계 서비스의 범주 구분 없이 적용이 가능하며, 생태계 서비스의 물리적 변화량을 측정하는 데 적합한 것으로 알려져 있다(Van *et al.* 1996; de Groot *et al.* 2010; Koo *et al.* 2012; Alam *et al.* 2016).

기후 조절 서비스 관련 인자인 탄소 지표는 탄소 저장량과 연간 탄소 흡수량으로 나뉘는데, 생태계를 대상으로 한 여러 연구에서 탄소 저장량이 주로 사용되고 있다(Alam *et al.* 2016). 국내에서도 다양한 탄소 관련 연구가 진행되고 있으나, 생태계 서비스 측면에서 지표 개발을 시도한 사례는 많지 않다(Choi *et al.* 2014). 이에 본 연구는 국내 주요 생태계 9개 유형에 대해 기존에 보고된 문헌을 바탕으로 탄소 저장량 자료를 추출하고 분석하여 온실가스 조절에 영향을 미치는 탄소 저장에 관한 지표를 산정하고자 하는 목적으로 수행되었다. 또한 탄소 저장량 추정치의 불확실도를 산정하여 탄소 저장량 지표의 신뢰성을 파악하고자 하였다.

자료 수집 및 분석

1. 탄소 저장 지표 산정

우리나라 전체 생태계를 대상으로 탄소 저장량에 대한 문헌 자료를 수집하였다. 수집한 문헌 자료는 환경부 토지피복도에 근거하여 나뉜 생태계 유형에 따라 도시녹지, 경작지, 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 초지, 담수, 연안, 해양 등 9개로 분류하였다(Kwon *et al.* 2015). 또한 생태계 유형별로 탄소 저장량을 측정하는 방법에 따라 현장조사 방법, 모형을 이용하는 모의 추정 방법, 위성영상을 이용하는 원격탐사 방법 등으로 자료를 분류하였다. 도시녹지, 산림, 담수 생태계는 탄소 저장량을 저장고(식생, 토양, 낙엽층, 고사목)별로 다시 구분하였고, 경작지 생태계는 처리 및 경작시스템별로 세분화하였다.

도시녹지 및 산림 생태계를 제외한 다른 생태계는 관련 문헌의 수가 제한되어 현장조사 방법을 이용한 연구 결과만을 이용하여 자료를 분석하였다. 초지 생태계는 GPG-LULUCF의 수준 1 방법에 따르면 시간에 따른 식생의 탄소 축적량에

변화가 없어 본 연구에서는 토양 탄소 저장량만을 사용하였다(Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea 2014).

2. 불확실도 산정

탄소 저장 지표의 불확실성은 2006 IPCC 가이드라인의 불확실성 평가 기법을 이용하며 상대추정오차로 단순 오차 전달 등식을 이용하는 수준 1 방법을 적용하여 식(1)에 따라 추정하였다(IPCC 2006).

$$\text{불확실도}(\%) = \frac{1/2(95\% \text{ 추정값의 신뢰구간})}{\text{추정치 평균}} \times 100\% \quad (1)$$

3. 통계분석

생태계 유형, 측정 방법 그리고 저장고별로 분류된 탄소 저장량 자료는 SAS 9.4 software (SAS Institute Inc., USA)를 이용하여 평균, 표준오차, 최솟값과 최댓값 등 기초 통계량을 제시하였다. 또한 탄소 저장량의 상대적 산포도를 비교하기 위해 변동계수를 제시하였다.

탄소 저장 지표

1. 도시녹지

식생의 탄소 저장량은 평균 5.6 tC ha^{-1} 이고, 표준오차가 0.6, 변동계수는 23.8%로 비교적 좁은 범위와 낮은 산포도를 보였다(Table 1). 토양의 평균 탄소 저장량은 28.2 tC ha^{-1} 로 식생보다 약 5배 정도 많은 탄소를 저장하였으며, 표준오차는 3.4, 변동계수는 17.1%로 나타났다. 반면, 식생과 토양을 동시에 측정한 연구를 대상으로 했을 때의 평균 탄소 저장량은 76.4 tC ha^{-1} 로 식생과 토양의 평균값을 합한 것보다 약 2배 정도 높았다. 이러한 차이는 수종, 수령, 지역, 측정 방법 등에 따른 것으로 사료된다. 원격탐사 방법에 의한 탄소 저장량 추정값은 침엽수가 110.6 kgC 본^{-1} 으로 활엽수의 73.7 kgC 본^{-1} 보다 더 높게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 도시녹지 생태계에서 탄소 저장량을 추정할 경우 식생 전체보다는 임상별로 구분하여 값을 제시할 필요가 있는 것으로 볼 수 있다.

2. 경작지

경작지 생태계는 처리별로 분류할 수 있는데, 연구 사례의 수가 적은 무처리 이모작을 제외하고 모든 처리에서 탄소

Table 1. Estimates for urban forest ecosystem carbon storage

Method	Storage component	Mean	SE	CV (%)	Max	Min	Uncertainty (%)
Field experiment	Vegetation biomass	5.6 tC ha ^{-1a}	0.6	23.8	7.2	3.6	19.1
	Soil	28.2 tC ha ^{-1b}	3.4	17.1	31.6	24.8	23.6
	Vegetation biomass + Soil	76.4 tC ha ^{-1c}	10.7	91.7	177.5	0.06	27.4
Satellite images	Deciduous trees	73.7 kgC tree ^{-1d}	—	—	—	—	—
	Coniferous trees	110.6 kgC tree ^{-1d}	—	—	—	—	—

^a Jo 1999; Jo and Ahn 2000; Jo *et al.* 2002; Lee *et al.* 2010b; Park *et al.* 2011; Han *et al.* 2014

^b Jo 1999; Jo and Han 1999; Jo *et al.* 2002

^c Jo and Ahn 2000

^d Kim *et al.* 2011

Mean = average; SE = standard error; CV = coefficient of variation; Max = maximum; Min = minimum.

Table 2. Estimates for agroecosystem carbon storage

Treatment	Cropping system	Mean (gC kg ⁻¹)	SE	CV (%)	Max	Min	Uncertainty (%)
None	Single	12.3 ^a	0.9	27.7	19.0	5.0	13.6
	Double	14.8 ^b	4.5	52.9	21.0	6.0	59.9
Fertilizers	Single	16.2 ^c	0.9	15.7	19.6	12.9	10.9
Fertilizers + Manures	—	23.5 ^d	—	—	—	—	—
Manures	—	16.9 ^e	2.2	31.3	25.3	9.5	25.0

^a Jung and Kim 2007; Park *et al.* 2008; Lee *et al.* 2010a; Yoo *et al.* 2012; Seo *et al.* 2014

^b Yoo *et al.* 2012

^c Jung and Kim 2007; Park *et al.* 2008; Lee *et al.* 2010a; Kim *et al.* 2012

^d Park *et al.* 2008

^e Jung and Kim 2007; Park *et al.* 2008; Kim *et al.* 2012; Hong *et al.* 2013; Seo *et al.* 2014

저장량의 표준오차가 0.7~0.9로 범위가 좁으며 변동계수가 20%로 낮은 산포도를 보였다(Table 2). 무처리에서 단작 경작시스템은 12.3 gC kg⁻¹, 이모작은 14.8 gC kg⁻¹으로 다른 처리에 비해 낮은 수치를 보였다. 그리고 퇴비와 화학비료를 처리하였을 때는 각각 16.0 gC kg⁻¹과 16.2 gC kg⁻¹으로 무처리보다 높은 값을 보였으며, 화학비료와 퇴비를 동시에 처리할 경우에는 23.5 gC kg⁻¹으로 가장 높은 탄소 저장량 값을 보였다. 무처리 경작지보다 화학비료와 퇴비를 혼용하였을 때 토양유기탄소의 함량이 높게 나타났는데, 이는 유기물 성분이 토양의 입단화를 촉진시켜 나타난 결과이다(Hong *et al.* 2013).

3. 활엽수림

활엽수림 식생의 평균 탄소 저장량은 현장조사 방법으로 추정된 값이 168.7 tC ha⁻¹, 원격탐사를 이용해 추정된 값이 63.9 tC ha⁻¹, 모형을 이용해 추정된 값이 81.5 tC ha⁻¹ 등으로 나타났다(Table 3). 현장조사 방법으로 추정된 값이 가장 높고 원격탐사를 이용해 추정된 값이 가장 낮게 나타났으나, 표준오차는 모두 10.1~10.6으로 유사하였다. 또한 토양과 낙엽층의 평균 탄소 저장량 역시 현장조사 방법으로 추정된 값이 각각 110.6 tC ha⁻¹와 5.7 tC ha⁻¹로 모형으로 추정된 값

인 70.1 tC ha⁻¹와 2.8 tC ha⁻¹보다 높았다. 고사목의 평균 탄소 저장량은 현장조사 방법으로만 추정되었으며, 그 값은 3.5 tC ha⁻¹로 식생의 평균 탄소 저장량의 약 2%에 해당하는 적은 양인 것으로 나타났다.

자료 분석 결과 대체로 현장조사 방법으로 추정된 값이 다른 측정 방법으로 추정된 값에 비해 높게 나타났는데, 이는 방법별 특성에 기인한 것으로 보인다. 즉 모형 방법은 2차원적 단면적 관계식을 이용하기 때문에 실측한 값보다 낮게 추정될 수 있다(Lim 2010; Yu *et al.* 2013; Lee *et al.* 2014; Son *et al.* 2014; Nam *et al.* 2015). 또한 원격탐사는 주로 2차원적 광학영상이 이용되었는데, 복층 식생 및 복잡한 지형을 가지는 산림에서는 탄소 저장량이 과소 추정되는 것과 관련이 있는 것으로 보인다(Vincent and Saatchi 1999; Cui *et al.* 2012).

4. 침엽수림

침엽수림 식생의 탄소 저장량은 현장조사 방법으로 측정된 값이 원격탐사와 모형 방법으로 추정된 값보다 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다(Table 4). 즉 식생의 평균 탄소 저장량은 현장조사, 원격탐사, 모형 방법에서 각각 111.9 tC ha⁻¹, 50.7 tC ha⁻¹, 60.6 tC ha⁻¹ 등이었다. 토양의 경우 현장조사와

Table 3. Estimates for deciduous forest ecosystem carbon storage

Method	Storage component	Mean (tC ha ⁻¹)	SE	CV (%)	Max	Min	Uncertainty (%)
Field experiment	Vegetation biomass	168.7 ^a	10.6	34.3	294.9	42.7	12.3
	Soil	110.6 ^b	8.0	42.9	222.0	16.9	14.2
	Litter	5.7 ^c	0.8	72.0	24.6	1.9	27.7
	Dead woods	3.5 ^d	—	—	—	—	—
Satellite images	Vegetation biomass	63.9 ^e	10.1	47.6	125.5	7.7	31.1
Models	Vegetation biomass	81.5 ^f	10.1	44.8	157.8	35.8	44.0
	Soil	70.1 ^g	3.8	7.6	73.8	66.3	10.5
	Litter	2.8 ^h	—	—	—	—	—

^a Lim *et al.* 2003; Kwon *et al.* 2004; Lee *et al.* 2009b; Lee 2011; Lee 2012a; Lee 2012b; Seo *et al.* 2012; Seo *et al.* 2013b; Won *et al.* 2014

^b Lim *et al.* 2003; Lee *et al.* 2009b; Lee 2011; Lee 2012a; Lee 2012b; Park *et al.* 2012a; Won *et al.* 2014

^c Lim *et al.* 2003; Lee *et al.* 2009b

^d Lee *et al.* 2009b

^e Chung *et al.* 2009; Chung 2010; Lim *et al.* 2010; Kim *et al.* 2011; Lee *et al.* 2011; Wie *et al.* 2011; Seo *et al.* 2012; Yu *et al.* 2013; Kim and Jang 2014

^f Son *et al.* 2006; Lim *et al.* 2010; Yu *et al.* 2013; Kim *et al.* 2014; Son *et al.* 2014; Nam *et al.* 2015

^g Lim *et al.* 2010; Kwon *et al.* 2012

^h Lim *et al.* 2010

Table 4. Estimates for coniferous forest ecosystem carbon storage

Method	Storage component	Mean (tC ha ⁻¹)	SE	CV (%)	Max	Min	Uncertainty (%)
Field experiment	Vegetation biomass	111.9 ^a	9.1	37.3	239.8	11.4	15.9
	Soil	86.0 ^b	10.5	54.6	190.0	41.0	23.9
	Litter	5.2 ^c	1.2	100.9	26.3	2.3	44.2
	Dead woods	2.2 ^d	—	—	—	—	—
Satellite images	Vegetation biomass	50.7 ^e	9.2	54.3	111.0	4.9	35.5
Models	Vegetation biomass	60.6 ^f	7.9	47.1	29.8	130.9	25.7
	Soil	68.8 ^g	—	—	—	—	—

^a Kwon *et al.* 2004; Lee *et al.* 2009b; Kang *et al.* 2010b; Seo *et al.* 2012; Kwon *et al.* 2013; Noh *et al.* 2013; Seo *et al.* 2013a

^b Lee *et al.* 2009a; Lee *et al.* 2009b; Noh *et al.* 2013

^c Lee *et al.* 2009b; Noh *et al.* 2013

^d Lee *et al.* 2009b

^e Chung *et al.* 2009; Chung 2010; Kim *et al.* 2011; Lee *et al.* 2011; Wie *et al.* 2011; Seo *et al.* 2012; Kim and Jang 2014

^f Son *et al.* 2006; Lee *et al.* 2009b; Yu *et al.* 2013; Kim *et al.* 2014; Nam *et al.* 2015

^g Kwon *et al.* 2012

모형을 이용한 값은 86.0 tC ha⁻¹와 68.8 tC ha⁻¹ 등이었으나, 모형을 이용하여 탄소 저장량을 연구한 결과는 Kwon *et al.* (2012)이 발표한 하나의 사례밖에 없었다. 낙엽층과 고사목은 현장조사 방법에서만 추정되었다. 식생 탄소 저장량의 변동계수는 현장조사에서 37.3%로 가장 낮은 수치를 보였다. 반면, 현장조사로 측정된 낙엽층의 탄소 저장량은 변동계수가 100.9%로 높은 산포도를 보였는데, 이는 침엽수림을 구성하고 있는 수종 및 실제 측정된 시기에 따라 차이가 크기 때문인 것으로 사료된다(Jo and Ahn 2000).

5. 혼효림

혼효림 식생의 탄소 저장량은 현장조사 방법으로 측정된 값이 다른 측정 방법으로 추정된 값보다 높게 나타났다(Table 5). 즉 식생의 평균 탄소 저장량은 현장조사, 원격탐

사, 모형을 추정된 값이 각각 122.6 tC ha⁻¹, 53.9 tC ha⁻¹, 60.1 tC ha⁻¹ 등으로 많게는 약 2.3배 차이를 보였다. 토양의 경우 현장조사는 131.8 tC ha⁻¹, 모형은 57.9 tC ha⁻¹로 현장조사에 의한 탄소 저장량이 2.3배 높았다. 측정 방법에 따른 탄소 저장량의 차이는 식생과 토양에서 유사하게 나타났다.

식생의 탄소 저장량 변동계수는 원격탐사 방법에서 64.1%로 현장조사에서 45.4%와 모형에서 21.5%와 비교하여 가장 높은 산포도를 가졌는데, 이는 원격탐사 방법의 경우 광학 영상의 종류와 취득 시기에 따라 탄소 저장량에 차이를 보이기 때문인 것으로 추정된다.

6. 초지

전국을 대상으로 한 초지 토양은 평균 66.3 tC ha⁻¹의 탄소를 저장하고 있으며, 표준오차와 변동계수가 각각 12.0과

Table 5. Estimates for mixed forest ecosystem carbon storage

Method	Storage component	Mean (tC ha ⁻¹)	SE	CV (%)	Max	Min	Uncertainty (%)
Field experiment	Vegetation biomass	122.6 ^a	27.8	45.4	204.8	83.2	44.5
	Soil	131.8 ^b	90.2	96.8	222.0	41.6	94.9
	Litter	17.4 ^c	–	–	–	–	–
	Dead woods	4.3 ^d	–	–	–	–	–
Satellite images	Vegetation biomass	53.9 ^e	6.8	64.1	193.2	15.5	24.6
Models	Vegetation biomass	60.1 ^f	7.5	21.5	75.2	52.1	24.3

^a Kwon *et al.* 2004; Lee *et al.* 2009b; Yim *et al.* 2009; Lee *et al.* 2015

^b Lee *et al.* 2009b; Lee *et al.* 2015

^c Lee *et al.* 2009b

^d Lee *et al.* 2009b; Jung *et al.* 2010; Yoo *et al.* 2011; Jung *et al.* 2014

^e Chung *et al.* 2009; Yim *et al.* 2009; Chung 2010; Lee *et al.* 2011; Wie *et al.* 2011

^f Park *et al.* 2012b; Lee *et al.* 2014

Table 6. Estimates for grassland ecosystem carbon storage

Method	Mean	SE	CV (%)	Max	Min	Uncertainty (%)
Field experiment	66.3 tC ha ^{-1a}	12.0	36.1	88.2	34.0	35.4
	72.5 gC kg ^{-1b}	23.7	65.5	125.0	27.5	64.2

^a Hong *et al.* 2010; Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea 2014

^b Yoo *et al.* 2012

Table 7. Estimates for wetland ecosystem carbon storage

Method	Storage component	Mean	SE	CV (%)	Max.	Min.	Uncertainty (%)
Field experiment	Vegetation biomass	5.6 tC ha ^{-1a}	–	–	–	–	–
	Soil	55.1 gC kg ^{-1b}	11.5	41.8	82.2	35.0	40.9

^a Kim *et al.* 2007

^b Yoon *et al.* 2014

Table 8. Estimates for coastal ecosystem carbon storage

Method	Mean (%)	SE	CV (%)	Max	Min	Uncertainty (%)
Field experiment	0.9 ^a	0.2	66.3	2.5	0.2	43.3

^a Lee and Lee 1999; Kang *et al.* 2008; Kang *et al.* 2010a; Kang *et al.* 2011

36.1%로 비교적 낮은 값을 보였다(Table 6). 다른 측정 방법을 이용한 연구의 사례는 2가지였으며, 탄소 저장량이 72.5 gC kg⁻¹을 보였으나 두 조사 지역 위치의 차이 때문에 변동 계수가 65.5%로 상대적으로 높게 나타났다.

7. 담수, 연안, 해양

담수 생태계의 식생 탄소 저장량은 5.6 tC ha⁻¹로 나타났으나, 연구 사례가 Kim *et al.* (2007)의 한 가지이므로 변동계수나 표준오차를 구할 수 없었다(Table 7). 토양의 평균 탄소 저장량은 55.1 gC kg⁻¹으로 나타났다. 그러나 표본의 수가 적

어 표준오차가 11.5, 변동계수가 41.8%로 높은 값을 보였다.

한편 연안의 퇴적물은 평균 0.9%의 탄소 저장량을 가지며 표준오차는 0.2로 낮게 나타났으나 최솟값과 최댓값 간에는 12.5배 차이가 있으며, 변동계수는 66.3%로 변이가 매우 크게 나타났다(Table 8).

해양 생태계의 탄소 저장량 연구는 사천면(동해)을 대상으로 진행한 하나의 연구 사례가 있다. 사천면에서 채취한 해수는 북태평양의 표본으로 평균 탄소 저장량은 2089.6 μmol kg⁻¹의 값을 보였다(Table 9). 탄소 저장량의 표준오차는 3.0, 변동계수는 0.5%로 낮은 산포도를 보였다.

Table 9. Estimates for marine ecosystem carbon storage

Site	Mean	SE	CV (%)	Max	Min	Uncertainty (%)
Sachon harbor (East Sea)	2089.6 $\mu\text{mol kg}^{-1a}$	3.0	0.5	2101.6	2073.1	0.3

^a Mo *et al.* 2015

불확실도

1. 도시녹지

현장조사 방법을 이용하여 추정된 탄소 저장량의 불확실도는 식생에서 19.1%로 가장 낮았고, 토양에서는 23.6%, 식생과 토양을 동시에 조사했을 때는 27.4%로 나타났다(Table 1). 토양 탄소 저장량의 불확실도는 식생에서보다 높게 나타났는데, 이는 토양을 대상으로 한 연구 사례의 수가 적었기 때문이다. 원격탐사 방법은 연구 사례가 한 가지여서 불확실도를 산정할 수 없었다.

2. 경작지

경작지 토양 탄소 저장량의 불확실도는 단작의 경우 화학비료 처리에서 10.9%로 가장 낮은 값을 보였으며 무처리에서 13.6%, 퇴비 처리에서 25.0% 순으로 높은 값을 보였다(Table 2). 이모작은 무처리에서 60%로 매우 높은 값을 보이는데, 이는 관련 연구의 수가 적기 때문인 것으로 사료된다.

3. 활엽수림

식생은 측정 방법별로 탄소 저장량의 불확실도가 각각 현장조사는 12.3%, 원격탐사는 31.1%, 모형은 44.0% 등으로 나타나 모형을 이용하여 탄소 저장량을 추정하는 것이 불확실도가 가장 높았다(Table 3). 반면, 토양 탄소 저장량의 불확실도는 각각 현장조사 방법에서 14.2%, 모형 방법에서 10.5%로 모형을 이용하는 방법에서 낮게 나타났다. 전체적으로 현장조사 방법에서 탄소 저장량의 불확실도가 낮은 값을 보였으나, 그 차이가 크지 않아 어느 측정 방법을 이용하더라도 불확실도가 낮은 탄소 저장량 추정이 가능한 것으로 판단된다.

4. 침엽수림

침엽수림 생태계에서 식생 탄소 저장량의 불확실도는 각각 현장조사에서 15.9%, 원격탐사에서 35.5%, 모형에서 25.7% 등으로 현장조사 방법으로 추정된 불확실도가 가장 낮게 나타났다(Table 4). 토양 탄소 저장량은 현장조사에서는 23.9%의 불확실도를 보였으나, 다른 측정 방법의 경우 연구 사

례가 한 가지이거나 아예 없어 불확실도가 존재하지 않았다.

5. 혼효림

혼효림 생태계는 다른 산림 생태계 유형과는 다르게 모형과 원격탐사에서 낮은 불확실도를 보였다(Table 5). 식생은 현장조사에서 44.5%, 원격탐사에서 24.6%, 모형에서 24.3% 등으로 현장조사를 이용하여 측정한 탄소 저장량의 불확실도가 가장 높았다. 한편 현장조사로 측정한 식생은 불확실도가 활엽수림에서 12.3%, 침엽수림에서 15.9%인 것에 비해 혼효림에서 44.5%로 가장 높았는데, 이는 혼효림의 고유 특성에서 기인한 것으로 보인다. 즉 혼효림은 2가지 이상의 수종들이 혼생하고 있어 구성하는 수종의 수에 따라 순림보다 불확실도가 높아질 가능성이 있다(Kwon *et al.* 2013). 토양은 전체 산림 생태계에서 94.9%로 가장 높은 불확실도 값을 보였는데, 이것은 연구 사례의 수가 적은 것이 원인이라 할 수 있다.

6. 초지

전국을 대상으로 한 초지 생태계 탄소 저장량의 불확실도는 35.4%이며, 다른 측정 방법의 불확실도는 64.2%로 약 2배 정도 높은 값을 보였다(Table 6). 후자의 경우 지리적 위치로 인한 기후인자의 차이를 고려하지 않고 여러 지역의 값을 하나의 유사한 조사지로 간주하였기 때문으로 보인다.

7. 담수, 연안, 해양

담수 생태계의 식생과 토양은 각각 하나의 연구 사례만이 존재하였다. 토양 탄소 저장량의 불확실도는 40.9%로 나타났다. 이는 수집된 자료의 수가 극히 적기 때문으로 보인다(Table 7).

연안 생태계는 현장조사 방법을 이용한 토양 탄소 저장량의 불확실도는 43.4%로 비교적 높은 값을 보였다(Table 8). 이는 측정 시기에 따른 탄소 저장량의 차이에 의한 것으로 볼 수 있다. 연안은 겨울철에는 이산화탄소 흡수원이지만 여름에는 생물의 호흡과 미생물 활동의 증가로 인하여 이산화탄소의 방출원이 되는 것으로 보고되었다(Kang *et al.* 2008).

사천면을 대상으로 연구한 해양 생태계 탄소 저장량의 불

확실도는 0.3%였다(Table 9). 불확실도가 현저히 낮은 이유는 측정 시기 및 시료 채취 지역이 동일하기 때문으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 우리나라 육상 및 수상 생태계의 탄소 저장량을 이용하여 탄소 저장 지표를 산정하였으며, 이 지표의 신뢰성을 높이기 위하여 국제기준에 따른 불확실도를 제시하였다.

육상 생태계의 식생 탄소 저장량은 활엽수림에서 가장 높았으며 다음으로 혼효림, 침엽수림, 담수와 도시녹지 생태계 순으로 낮은 값을 보였다. 토양의 탄소 저장량은 혼효림에서 가장 높았으며, 활엽수림, 침엽수림, 초지 생태계 순으로 낮았고, 경작지 생태계의 경우 무처리에서 토양 탄소 저장량이 가장 낮았다.

불확실도의 경우 현장조사 방법을 기준으로 육상 생태계 식생의 값을 비교하였을 때 활엽수림에서 가장 낮았다. 그리고 토양 탄소 저장량의 불확실도는 경작지 생태계의 무처리에서 가장 낮은 값을 보였다. 지표 산정 시에 가장 높은 신뢰도를 보인 측정 방법은 생태계 유형에 따라 다르게 나타났다. 도시녹지, 활엽수림, 침엽수림에서는 현장조사 방법을 이용하였을 때, 혼효림에서는 모형을 이용하였을 때 불확실도가 가장 낮아 결과의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 한편 경작지는 경작시스템에 따라 불확실도가 다르게 나타났으며, 그 값은 단작시스템에서 가장 낮았다. 연안, 해양, 초지 및 담수 생태계는 연구 사례의 수가 적어 불확실도가 매우 높거나 아예 존재하지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서 국내에서 진행된 소수의 관련 연구를 대상으로 탄소 저장량을 추정하여 기후 조절 지표로 산정하였다. 이는 대략적인 지표로써 생태계 서비스를 이해하는 데에 도움을 줄 수 있으나, 신뢰성이 높은 지표를 산정하기 위해서는 다양한 생태계 유형에서 추가 연구가 필요한 것으로 보인다. 이러한 지표개발의 결과물은 다양한 생태계 서비스의 양적인 측정을 가능하게 하며, 이는 의사결정 단계에 중요한 과학적 자료로 이용될 수 있을 것이다(Choi 2002).

적 요

본 연구는 생태계 조절 서비스 중에 하나인 기후 조절 서비스 산정을 위한 국내 주요 생태계의 탄소 저장 지표를 산정하는 것을 목적으로 하였다. 국내에서 진행된 선행 연구

를 바탕으로 주요 생태계(도시녹지, 경작지, 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 초지, 담수, 연안, 해양)의 탄소 저장량을 이용하여 탄소 저장 지표를 산정하였다. 또한 다양한 측정 방법으로 추정된 탄소 저장 지표의 불확실도를 국제기준에 따라 산정하였다. 국내 주요 생태계의 조절 서비스를 생태계 유형, 측정 방법 그리고 저장고별로 정량화한 결과 탄소 저장 지표는 산림 생태계에서 가장 높은 값을 보였다.

사 사

본 연구는 국립생태원(전략연구-2015-03-02)과 환경부(2014001310008)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn SE and DH Bae. 2014. The economic value of freshwater ecosystem services based on the evidences from the environmental valuation information system. *J. Environ. Policy Admin.* 22:27-54.
- Alam M, J Dupras and C Messier. 2016. A framework towards a composite indicator for urban ecosystem services. *Ecol. Indic.* 60:38-44.
- Choi HA, SW Jeon, JS Kim, HB Kwak, MI Kim, JU Kim, JT Kim and WK Lee. 2014. Quantifying climate change regulating service of forest ecosystem-focus on quantifying carbon storage and sequestration. *Clim. Change Res.* 5:21-36.
- Choi MH. 2002. Valuation method of the ecosystem-superiority of service-to-service approach. *Korean Assoc. Environ. Sociol.* 6:97-140.
- Chung SY, JS Yim, HK Cho, JH Jeong, SH Kim and MY Shin. 2009. Estimation of forest biomass for Muju county using biomass conversion table and remote sensing data. *J. Korean For. Soc.* 98:409-416.
- Chung SY. 2010. Study on the estimation method of forest biomass using remote sensing data. Kookmin University. Seoul.
- Cui GS, WK Lee, WH Zhu, JY Lee, HB Kwak, SH Choi, DA Kwak and TJ Park. 2012. Vegetation classification and biomass estimation using IKONOS imagery in Mt. Changbai mountain area. *J. Korean For. Soc.* 101:356-364.
- de Groot RS, R Alkemade, L Braat, L Hein and L Willemsen. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecol. Complex.* 7:260-272.

- Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea. 2014. National greenhouse gas inventory report of Korea. pp. 270-277.
- Han MK, KJ Kim and KC Yang. 2014. Comparison of carbon storages, annual carbon uptake and soil respiration to planting types in urban park - The case study of Dujeong Park in Cheonan city. Korean J. Environ. Ecol. 28:142-149.
- Hong CO, JS Kang, HM Shin, JH Cho and JM Suh. 2013. Effect of compost and tillage on soil carbon sequestration and stability in paddy soil. J. Environ. Sci. Int. 22:1509-1517.
- Hong SY, YS Zhang, YH Kim, MS Kim, EY Choe and SK Ha. 2010. A study on estimating soil carbon storage in Asian countries and Korea. Korean J. Soil. Sci. Fert. 10:148-149.
- IPCC. 2006. Chapter 3: Uncertainties. pp. 57-63. In 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama.
- Jeon SW, JU Kim and HC Jung. 2013. A study on the forest classification for ecosystem services valuation. J. Korean Env. Tech. 16:31-39.
- Jo HK. 1999. Carbon uptake and emissions in urban landscape, and the role of urban greenspace for several cities in Kangwon Province. J. Korean Inst. Landscape Archit. 27:39-53.
- Jo HK and GS Han. 1999. Comparison of soil characteristics and carbon storage between urban and natural lands. J. For. Sci. 15:71-76.
- Jo HK and TW Ahn. 2000. Indicators of carbon storage and uptake by tree growth in natural ecosystem. Kor. J. Env. Eco. 14:175-182.
- Jo HK, YH Cho and TW Ahn. 2002. Capacity and value of atmospheric purification for Namsan Nature Park in Seoul. Kor. J. Env. Eco. 16:172-178.
- Jung JH, HC Nguyen, KM Kim, JH Im and J Heo. 2014. Estimation of aboveground forest biomass carbon stock by satellite remote sensing - A comparison between k-Nearest Neighbor and regression tree analysis. Korean J. Remote Sens. 30:651-664.
- Jung JH, J Heo, SH Yoo, KM Kim and JB Lee. 2010. Estimation of aboveground biomass carbon stock in Danyang area using kNN algorithm and Landsat TM seasonal satellite images. J. Korean Soc. Geo-spatial Inf. 12:119-129.
- Jung WK and SK Kim. 2007. Soil organic carbon dynamics in Korean paddy soils. Korean J. Soil. Sci. Fert. 40:36-42.
- Kang DH, BH Kwon, IK Kim and SS Kim. 2008. Observation of variation in soil organic carbon and carbon dioxide in constructed wetland at Goheung Bay. J. Fish. Mar. Sci. Edu. 20:58-67.
- Kang DH, HS Yu, PS Kim, KH Kim and BH Kwon. 2011. Seasonal and spatial variations of CO₂ fluxes between surface and atmosphere in foreshore, paddy field and woods sites. J. Environ. Sci. 20:963-975.
- Kang DH, PG Kim and BH Kwon. 2010a. CO₂ respiration characteristics with physicochemical properties of soils at the coastal ecosystem in Suncheon Bay. J. Environ. Sci. 19:217-227.
- Kang KN, GW Park, SJ Lee, HG Lee, JS Kim and YT Kim. 2010b. Carbon storages in aboveground and root of *Pinus koraiensis* and *Larix leptolepis* stands in Gongju, Chungnam Province. J. Agric. Sci. 37:45-52.
- Kim KT, JW Cho and HH Yoo. 2011. Carbon storage estimation of urban area using KOMPSAT-2 imagery. J. Korean Soc. Geo-spatial Inf. 19:49-54.
- Kim MS, YH Kim, SS Kang, HB Yun and BK Hyun. 2012. Long-term application effects of fertilizers and amendments on changes of soil organic carbon in paddy soil. Korean J. Soil. Sci. Fert. 45:1108-1113.
- Kim SH and DH Jang. 2014. Analysis of forest types and estimation of the forest carbon stocks using Landsat satellite images in Chungcheongnam-do, South Korea. J. Korean Assoc. Reg. Geogr. 20:206-216.
- Kim TG, PH Lee and KH Oh. 2007. The actual vegetation map, standing crop biomass and primary productivity of *Salix* spp. in the Upo wetland. J. Korean Wetlands Soc. 9:33-43.
- Kim YH, EJ Jeon, MY Shin, IB Chung, ST Lee, KW Seo and JK Pho. 2014. A study on the baseline carbon stock for major species in Korea for conducting carbon offset projects based on forest management. J. Korean For. Soc. 103:439-445.
- Koo MH, DK Lee and TY Jung. 2012. A study on the contexts of ecosystem services in the policymaking process. J. Korean Env. Res. Tech. 15:85-102.
- Kwon BR, HY Shin, NJ Heo, JK Choi and MJ Yi. 2013. Carbon storage in and age-sequence of *Pinus densiflora* stands in eastern Kangwon, Korea. Korean Inst. For. Rec. Welfare. 4:600-602.
- Kwon HS, JS Shin, TH Lee, BH Sung and S Choi. 2015. Typology of ecosystem for ecosystem service assessment. J. Korean Soc. Geo-spatial Inf. 5:53-54.
- Kwon SD, YM Son, KH Lee, SK Chong and JM Kim. 2004. Stand growth analysis and carbon storage/removals assessment using the data of forest growth monitoring plots. J. Kor. For. En. 23:1-8.
- Kwon SS, SH Choi and SD Lee. 2012. Estimation of spatial-temporal net primary productivity and soil carbon storage change in the capital area of South Korea under climate change. J. Environ. Impact Assess. 21:757-765.
- Lorenz K. 2013. Ecosystem carbon sequestration. pp. 39-62. In Ecosystem Services and Carbon Sequestration in the Bio-

- sphere. Springer. London.
- Lee AR, NJ Noh, TK Yoon, SK Lee, KW Seo, WK Lee, YS Cho and Y Son. 2009a. Estimation of forest soil carbon stocks with Yasso using a dendrochronological approach. *J. Korean For. Soc.* 98:791-798.
- Lee CH, SY Kim, CY Park, KY Jung and PJ Kim. 2010a. Effects of long-term fertilization on carbon and nitrogen sequestration in mono-rice paddy soil. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 1:287-288.
- Lee DK, JH Park and C Park. 2010b. Estimation of carbon uptake for urban green space: A case of Seoul. *J. Environ. Impact Assess.* 19:607-615.
- Lee J, TK Yoon, S Han, S Kim, MJ Yi, GS Park, C Kim, YM Son, R Kim and Y Son. 2014. Estimating the carbon dynamics of South Korean forests from 1954 to 2012. *Biogeosci.* 11:4637-4650.
- Lee JB, KM Kim, ES Kim, SH Lee, JH Jung and HJ Park. 2011. Accuracy assessment of estimation methods for forest carbon stocks by National Forest Inventory data, RS and GIS. *J. Korean Soc. Geo-spatial Inf.* 241-244.
- Lee NY. 2011. Estimation of carbon storage in three cool-temperate broad-leaved deciduous forests at Bukhansan National Park, Korea. *J. Natl. Park Res.* 2:53-57.
- Lee NY. 2012a. Estimation of carbon storage in three cool-temperate broad-leaved deciduous forests at Jirisan National Park, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 30:121-127.
- Lee NY. 2012b. Estimation of carbon storage in three cool-temperate broad-leaved deciduous forests at Seoraksan National Park, Korea. *J. Natl. Park Res.* 3:9-13.
- Lee NY, KT Na, JM Noh and SK Shim. 2015. Estimation of carbon storage in a forest ecosystem at Mudeungsan Mt. National Park, Korea. *J. Natl. Park Res.* 6:1-6.
- Lee SE and DS Lee. 1999. Determination of organotin compounds, total tin and total organic carbon in tidal flat with GF-AAS, GC-FPD and GC-MS. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 11:5-6.
- Lee SK, NJ Noh, SJ Heo, TK Yoon, AR Lee, SA Razak, WK Lee and Y Son. 2009b. Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon. *J. Korean For. Soc.* 98:772-779.
- Lim HJ, YH Lee and HJ Kwon. 2010. Evaluation of Community Land Model version 3.5-Dynamic Global Vegetation Model over deciduous forest in Gwangneung, Korea. *Korean Meteorol. Soc.* 4:331-332.
- Lim JH, JH Shin, GZ Jin, JH Chun and JS Oh. 2003. Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung natural forest in Korea. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 5:101-109.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. pp. 49-70. *Ecosystems and human well-being: A framework for assessment.* In Millennium Ecosystem Assessment. Island Press. Washington DC.
- Mo A, J Son and Y Park. 2015. Determination of total CO₂ and total alkalinity of seawater based on thermodynamic carbonate chemistry. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy.* 18:1-8.
- Nam K, M Kim, WH Kwak, WH Byun, H Yu, H Kwak, T Kwon, J Sung, D Chung, SH Lee and WK Lee. 2015. Spatio-temporal change in forest cover and carbon storage considering actual and potential forest cover in South Korea. *Sci. China.* 58:713-723.
- Noh NJ, C Kim, SW Bae, WK Lee, TK Yoon, H Muraoka and Y Son. 2013. Carbon and nitrogen dynamics in a *Pinus densiflora* forest with low and high stand densities. *J. Plant Ecol.* 6:368-379.
- Park CW, K Yi, Y Son, NJ Noh, TK Yoon, S Han, RH Kim and KH Lee. 2012a. Application of Korea-specific forest soil carbon model (KFSC) to oak forests and validation. *J. Korean For. Soc.* 1:184-185.
- Park HJ, HS Shin, YH Roh, KM Kim and KH Park. 2012b. Estimating forest carbon stocks in Danyang using Kriging methods for aboveground biomass. *J. Korean Soc. Geo-spatial Inf.* 15:16-33.
- Park JH, SY Woo, SZ Ryang, KH Lee and YM Son. 2011. Studies on estimation of carbon storage & development of biomass equations of urban forest. *J. Korean For. Soc.* 1:295-297.
- Park KD, CH Lee, KY Jung, IS Son, UG Kang, HW Kang and PJ Kim. 2008. Effects of long-term compost fertilization on carbon storage in paddy soil. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 1:98-99.
- Schimel D, J Melillo, H Tian, AD McGuire, D Kicklighter, T Kittel, N Rosenbloom, S Running, P Thornton, D Ojima, W Parton, R Kelly, M Sykes, R Neilson and B Rizzo. 2000. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science* 287:2004-2006.
- Seo HS, DH Park, JS Yim and JS Lee. 2012. Assessment of forest biomass using k-Neighbor techniques - A case study in the research forest at Kangwon National University. *J. Korean For. Soc.* 101:547-557.
- Seo KW, ST Lee, JM Jung and SK Kim. 2013a. Stand growth and aboveground carbon stocks of *Pinus densiflora* stands after thinning to different intensities in central Korea. *Korean Inst. For. Rec. Welfare.* 4:662-664.
- Seo MC, HS Cho, KY Seong, MT Kim, JH Ryu, TS Park and HW Kang. 2014. The study on changes of morphological soil carbon according to the kinds of organic matters. Ko-

- rean J. Soil. Sci. Fert. 1:154-155.
- Seo YO, SC Jung, JO Kwon, JH Park, YM Son, KH Lee and YJ Lee. 2013b. Aboveground biomass and carbon storage of *Betula platyphylla* stands in Gangwon Province. Korean Inst. For. Rec. Welfare. 4:169-170.
- Son YM, KH Lee, RH Kim and JH Seo. 2006. Stand development estimate and carbon stocks/removals assessment using stand growth monitoring. J. Kor. For. En. 25:42-48.
- Son YM, SW Kim, SJ Lee and JS Kim. 2014. Estimation of stand yield and carbon stock for *Robinia pseudoacacia* stands in Korea. J. Korean For. Soc. 103:264-269.
- Song CH, HA Choi, SW Jeon, JU Kim, JS Kim, JT Kim and WK Lee. 2015. Application of InVEST water yield model for assessing forest water provisioning ecosystem service. J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud. 18:120-134.
- Van Wilgen BW, RM Cowling and C Burgers. 1996. Valuation of ecosystem services. BioSci. 46:184-189.
- Vincent MA and SS Saatchi. 1999. Comparison of remote sensing techniques for measuring carbon sequestration. Jet Propulsion Laboratory Publisher. California Institute of Technology.
- Wie GJ, H Lee, DH Lee, JM Cho and YC Suh. 2011. Estimation of the carbon absorption of a forest using Lidar data. J. Koran Soc. Surv. 29:55-62.
- Won HY, CH Shin and HT Mun. 2014. Valuation of ecosystem services through organic carbon distribution and cycling in the *Quercus mongolica* forest at Mt. Worak National Park. J. Wetlands Res. 16:315-325.
- Yim JS, WS Han, JH Hwang, SY Chung, HK Cho and MY Shin. 2009. Estimation of forest biomass based upon satellite data and National Forest Inventory data. Korean J. Remote Sens. 25:311-320.
- Yoo GY, HJ Kim, YS Kim and MH Jung. 2012. Soil carbon and microbial activity influenced by pasture and rice paddy management. Korean J. Soil Sci. Fert. 45:435-443.
- Yoo SH, J Heo, JH Jung, SH Han and KM Kim. 2011. Estimation of aboveground biomass carbon stock using Landsat TM and ratio Images. J. Korean Soc. Geo-spatial Inf. Syst. 6:39-48.
- Yoon TK, NJ Noh, S Han, J Lee and Y Son. 2014. Soil moisture effects on leaf litter decomposition and soil carbon dioxide efflux in wetland and upland forests. Soil Sci. Soc. Am. J. 78:1804-1816.
- Yu HN, WK Lee, Y Son, DA Kwak, KJ Nam, MI Kim, JY Byun, SJ Lee and TS Kwon. 2013. Estimating carbon stocks in Korean forests between 2010 and 2110: a prediction based on forest volume-age relationships. For. Sci. Tech. 9:105-110.

Received: 30 January 2016

Revised: 8 March 2016

Revision accepted: 10 March 2016