

Research Paper

## 산림의 CO<sub>2</sub> 흡수량 평가를 위한 통계 및 공간자료의 활용성 검토 - 안산시를 대상으로 -

김성훈 · 김일권 · 전배석 · 권혁수

국립생태원 생태연구본부 융합연구실

### A Study on the Availability of Spatial and Statistical Data for Assessing CO<sub>2</sub> Absorption Rate in Forests

- A Case Study on Ansan-si -

Sunghoon Kim · Ilkwon Kim · Baysok Jun · Hyuksoo Kwon

National Institute of Ecology

**요약** : 본 연구는 안산시 산림을 대상으로 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 평가를 위한 통계 및 공간자료의 활용성을 검토하였다. 통계자료, 임상도(1:5,000), 산림수종 표준 탄소흡수량 자료들을 활용해 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정하였다. 또한 세분류토지피복도를 이용한 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 분석 및 활용성을 검증하였다. 통계자료를 이용한 경우 2010년을 기준으로 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량의 차이가 컸다. 이는 2010년부터 산림기본통계의 작성 방법이 고도화됨에 따라 임목축적이 급격히 증가한 결과이다. 향후 통계자료를 활용할 경우 최근의 산림기본통계를 이용한 보정이 필요하다. 임상도(1:5,000)와 산림기본통계(2015, 2010)의 시기 차이를 이용한 방법은 수종들의 성장량에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수량이 반영되지 않았다. 산림수종 표준 탄소흡수량 자료와 임상도(1:5,000)를 이용한 결과 연간 42,369 ton을 흡수하였다. 세분류토지피복도와 산림수종 표준 탄소흡수량 자료를 이용한 결과는 40,696 ton이었다. 임상도(1:5,000)를 이용하여 세분류토지피복도를 검증한 결과  $p < 0.01$  수준에서 유의했고, 흡수량 차이는 1,673 ton이었다. 본 연구는 다양한 산림활동의 온실가스 감축 효과 평가에 있어 객관적 기준을 적용하는 일환으로서 의의를 지닌다. 나아가 탄소흡수원과 관련된 토지이용 및 관리 등의 의사결정 지원을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

**주요어** : 생태계서비스, 산림기본통계, 1:5,000임상도, 토지피복도, 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량

First Author: Sunghoon Kim, Research Fellow, Bureau of Ecological Research, Division of Ecosystem Services & Research Planning, National Institute of Ecology, E-mail: dark4v@nie.re.kr

Corresponding Author: Hyuksoo Kwon, Senior Researcher, Bureau of Ecological Research, Division of Ecosystem Services & Research Planning, National Institute of Ecology, E-mail: ulmus96@nie.re.kr

Co-Authors Author: Ilkwon Kim, Research Fellow, Bureau of Ecological Research, Division of Ecosystem Services & Research Planning, National Institute of Ecology, E-mail: ikkim@nie.re.kr

Baysok Jun, Research Fellow Bureau of Ecological Research, Division of Ecosystem Services & Research Planning, National Institute of Ecology, E-mail: baysokjun@nie.re.kr

Received: 29 August, 2017. Revised: 27 February, 2018. Accepted: 5 March, 2018.

**Abstract :** This research was conducted to examine the availability of spatial data for assessing absorption rates of CO<sub>2</sub> in the forest of Ansan-si and evaluate the validity of methods that analyze CO<sub>2</sub> absorption. To statistically assess the CO<sub>2</sub> absorption rates per year, the 1:5,000 Digital Forest-Map (Lim5000) and Standard Carbon Removal of Major Forest Species (SCRMF) methods were employed. Furthermore, Land Cover Map (LCM) was also used to verify CO<sub>2</sub> absorption rate availability per year. Great variations in CO<sub>2</sub> absorption rates occurred before and after the year 2010. This was due to improvement in precision and accuracy of the Forest Basic Statistics (FBS) in 2010, which resulted in rapid increase in growing stock. Thus, calibration of data prior to 2010 is necessary, based on recent FBS standards. Previous studies that employed Lim5000 and FBS (2015, 2010) did not take into account the CO<sub>2</sub> absorption rates of different tree species, and the combination of SCRMF and Lim5000 resulted in CO<sub>2</sub> absorption of 42,369 ton. In contrast to the combination of SCRMF and Lim5000, LCM and SCRMF resulted in CO<sub>2</sub> absorption of 40,696 ton. Homoscedasticity tests for Lim5000 and LCM resulted in p-value <0.01, with a difference in CO<sub>2</sub> absorption of 1,673 ton. Given that CO<sub>2</sub> absorption in forests is an important factor that reduces greenhouse gas emissions, the findings of this study should provide fundamental information for supporting a wide range of decision-making processes for land use and management.

**Keywords :** Ecosystem services, Forest basic statistics, 1:5,000 Digital Forest Map, Land Cover Map, Annual CO<sub>2</sub> absorption

## I. 서론

생태계서비스는 생태계로부터 인간이 얻는 혜택을 의미하며 크게 공급, 조절, 문화, 지지서비스 등으로 구분된다(MA 2005). MA (2005)와 TEEB (2010)의 연구를 바탕으로, 생태계서비스 연구는 개념적인 연구에서 정책적 연구로 발전하고 다양한 영역으로 확대되고 있으며, 국내에서도 다양한 분야에서 생태계 서비스 연구가 수행되고 있다(Jeon et al, 2013; Song et al, 2015; Kim et al, 2016; Roh et al, 2016). 이 중에서 탄소흡수는 기후변화와 밀접한 관련이 있고, 이미 시장가격이 형성되어 있기 때문에 다른 연구에 비해 활발히 진행 중이다(IPCC 2003; Elmqvist et al, 2015; Roh et al, 2016).

산림은 국토 면적 63% 이상을 차지하며(KFS 2015), 기후조절, 대기정화, 국토보전, 생활환경보전 및 휴양서비스 등 다양한 공익적 기능을 지니는 중요한 생태계이다(KFRI 2012). 특히 산림이 주요한 온실가스흡수원으로 인정받으면서 그 역할이 새롭게 조명되었다(NIFoS 2016). 산림 CO<sub>2</sub> 저장량을 산정하기 위한 방법은 IPCC 가이드라인을 통해 확립됐고

(IPCC 2003), 국내에서도 이를 적용하여 평가하고 있다(GGIRCK 2016).

제5차 산림기본계획(변경)중 3대 핵심과제로 기후변화 대응 탄소흡수원 확충이 선정되었고, 지속적인 조림, 숲 가꾸기를 통해 국내 산림에서 연간 3천만톤의 CO<sub>2</sub> 순흡수 역량을 유지하는 것을 목표로 하고 있다(KFS 2013). 또한 제1차 탄소흡수원 증진 종합 계획을 수립하여 세부적인 목표와 전략들을 수립하고 있다(KFS 2014). 국가계획은 지역단위의 원활한 이행을 그 성과를 달성할 수 있다. 지역단위의 일관된 온실가스 흡수량 평가를 기반으로 탄소흡수원 관리를 위한 적절한 토지이용은 국가계획의 목표를 지원할 수 있고, 나아가 탄소흡수원을 고려한 환경영향평가 및 의사결정지원을 위한 기초자료를 제공할 수 있다(Lee et al, 2017).

현재 국내에서는 격자 단위로 산림의 탄소저장량 추정을 위한 연구들이 다수 진행되었다. 국가산림자원조사 자료와 위성영상, 임상도 등을 결합한 공간통계기법 연구가 주를 이루었고(Park et al, 2012; Kim et al, 2014; Jung et al, 2014; Lee et al, 2015; Kim et al, 2015; Seo et al, 2017), 산림기본통계를

기반으로 산림 바이오매스 자원량을 평가하고 지도화 한 연구도 있었다(Son et al. 2014). Hong et al. (2011)과 Cha et al. (2013)는 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 영상을 활용하여 남한지역 순 일차생산량의 시공간적 변화를 분석하였고, Yoo et al. (2012)는 생태계 모형을 통해 한국의 생태계 탄소 수지를 측정하는 바 있다. 미기상학적 에디 공분산법을 활용하여 생태계와 대기 간 탄소 순환을 측정하는 연구도 수행되었다(Lee et al. 2017). 국외에서도 산림 탄소흡수량에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 다양한 규모와 생태계를 대상으로 현장연구와 실측기반, 원격탐사 기반 등의 연구가 다수 수행되었다(Laurin et al. 2016; Rana et al. 2016; Tian et al. 2016; Schlund et al. 2017).

국내외에서 진행된 연구들은 공간통계기법, RS/GIS기법 등 과학적 방법을 적용하여 신뢰할 수 있는 산림의 탄소저장량을 분석하는데 집중되어왔다. 하지만 국내의 경우 탄소흡수량의 변화 및 평가에 대한 연구는 국가단위로 진행되고 있으며(GGIRCK 2016), 지역단위의 평가 연구는 미흡하다. 지역단위를 중심으로 현장자료와 공간자료를 결합한 공간통계기법 연구들이 수행되었지만, 산림의 탄소저장량 추정과 분석방법의 개선이 주된 목적이었다. MODIS 영상을 활용한 연구들은 해상도 차이로 인해 지역단위에 적

용하기는 한계가 있다.

본 연구는 국내에서 발표된 산림의 탄소흡수량에 관한 자료들을 참고하고 통계자료 및 공간자료를 활용하여 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량 및 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 평가하고자 한다. 자료에 따른 산림의 CO<sub>2</sub> 흡수량 차이와 원인을 고찰하고 앞으로의 적절한 흡수량 평가 방향을 제시하여, 향후 지역단위에서 의사결정 수준의 이해당사자들이 탄소흡수량을 분석하고 이해하는데 기여하고자 한다.

## II. 연구지역 및 연구방법

### 1. 연구지역

안산시는 다양한 생태계가 분포하는 지역으로 (Figure 1), 세분류토지피복도를 기준(2014년 구축)으로 시가화/건조지역은 29.1%(47.4km<sup>2</sup>)를 차지하며, 산림 26.6%(43.3km<sup>2</sup>), 농경지 15.8%(25.8km<sup>2</sup>), 초지 13.4%(21.7km<sup>2</sup>), 나지 8.5%(13.8km<sup>2</sup>), 수역 3.4%(5.5km<sup>2</sup>), 습지 3.2%(5.3km<sup>2</sup>)의 비율을 보인다. 행정경계 기준으로 세분류토지피복도를 추출하였기 때문에 연안습지와 수역의 비율이 낮게 나타났으며, MOF (2013)의 기준에 따르면 안산시 연안습지의 면적은 49.3km<sup>2</sup>이다. 안산시는 생태계의 지속가능한 이용을 위해 다양한 환경 및 생태계서비스 정책을 도입하고 있다. ‘숲의 도시’라는 시 슬로건에 맞게 도시

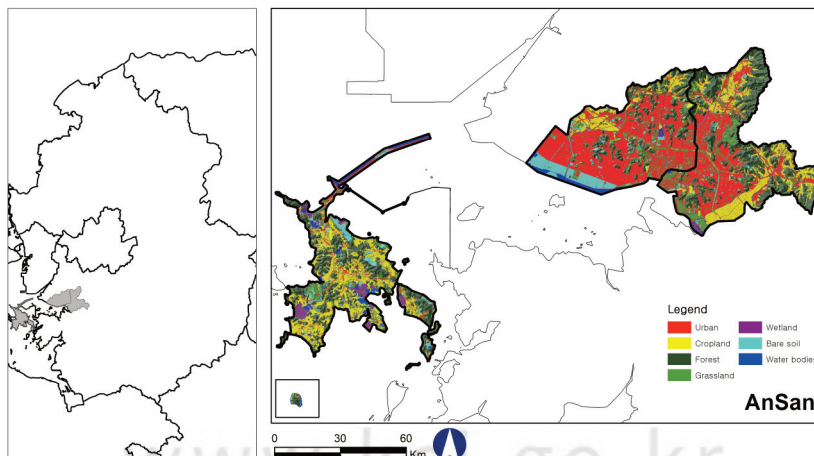


Figure 1. Location of the study area and land cover types.

숲을 조성하고, 녹지 공간 확보를 위해 다양한 노력을 기울이고 있다(Ansan-si 2015). 안산환경재단은 안산갈대습지를 대상으로 생태계서비스 평가연구를 진행하고 있으며, 안산의 2030 생태도시 비전을 제시하기 위해 생태계서비스 개념을 적용한 연구도 수행하였다(AGEC 2016). 본 연구는 산림이 지니는 탄소 흡수의 조절서비스 평가를 정책 활용적인 측면을 고려하여 안산시를 연구지역으로 선정하였다.

## 2. 연구방법

안산시 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량을 산정하기 위해 다음과 같은 연구방법을 수행하였다. 먼저 통계자료 및 바이오매스 전환계수를 이용하여 연구지역 1995년~2015년간 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량을 분석하였다. 사용한 통계자료는 안산시의 임상별 임목축적이며, 바이오매스 전환계수는 국가 산림 온실가스 통계 작성에 활용되는 임상별 계수를 활용하였다(Table 1). 통계자료를 이용한 산림 CO<sub>2</sub> 저장량은 아래 식 1과 같이 구할 수 있다(KFRI 2012). 각 연도별로 산출된 CO<sub>2</sub> 저장량은 축적차이법을 통해 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량으로

재산정하였다.

$$\text{산림 CO}_2 \text{ Stock(ton)} = \text{임목 순생장량} * D * \text{BEF} * (1+R) * 0.5 * 44/12 \quad (\text{식 1})$$

공간자료를 이용하여 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량 및 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 분석하였다. 1:5,000임상도(Lim5000)에 산림기본통계(2010, 2015)를 각각 적용하여 해당 연도의 산림 CO<sub>2</sub> 저장량을 산정하고 5년간의 차이를 이용해 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 추정하였다. 이를 각각 Lim5000+FBS2010, Lim5000+FBS2015로 표기하였다. 1:5,000임상도는 임상, 수종(죽림 제외한 42개 수종), 임령 등의 정보를 제공한다. 현재 제공되는 산림기본통계는 임상별·임령별 혹은 수종별·임령별에 대한 자료는 제공되지 않는다. 임상이 합산된 영급별 임목축적과 영급이 합산된 임상별 임목축적 자료만 활용 가능하다. 이중 1:5,000임상도와 안산시의 영급별 임목축적(Table 2), 국내 주요수종별 바이오매스 전환계수(KFRI 2015)를 적용하여 분석을 실시하였다.

다음으로 산림청에서 발표한 '주요 산림수종의 표

Table 1. Biomass conversion factors for forest types

Conversion Factor \ Forest type	Coniferous forest	Deciduous forest	Mixed Forest
basic wood Density (D)	0.46	0.68	0.57
Biomass Expansion Factor (BEF)	1.43	1.51	1.47
Root-shoot ratio (R)	0.27	0.36	0.32
Carbon Fraction (CF)	0.5		
Carbon Dioxide Fraction	44/12		

Source : Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, 2016, National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea

Table 2. Forest basic statistics used for analysis

Age class \ m <sup>3</sup> / ha	FBS (2010)			FBS (2015)		
	m <sup>3</sup>	ha	m <sup>3</sup> / ha	m <sup>3</sup>	ha	m <sup>3</sup> / ha
10	-	40	0.0	-	136	0.0
20	18,361	498	36.9	3,843	112	34.3
30	78,249	952	81.4	82,131	698	117.7
40	491,279	4,053	121.2	703,016	4,550	154.5
50	101,196	708	142.9	113,759	592	192.2
60	464	3	154.7	18,369	71	258.7

FBS : Forest Basic Statistics

준 탄소흡수량' 자료(KFRI 2012)와 1:5,000임상도, 세분류토지피복도(LCM)를 연계하여 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정하였다. 이 방법은 Lim5000 + KFRI2012, LCM + KFRI2012로 표기하였다. KFRI (2012)는 국내 주요 8수종(강원지방소나무, 중부지방소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 편백나무, 상수리나무, 신갈나무)에 대하여 임령별 연간 ha당 CO<sub>2</sub> 흡수량에 대한 정보를 담고 있다. 따라서 수종들이 일치하면 해당 값을 그대로 적용하였고, 그렇지 않은 경우 임상별 평균값을 도출하여 적용하였다. 세분류토지피복도는 임상의 임령에 대한 정보가 없어 산림기본통계(2015)를 바탕으로 임령의 비율이 가장 높은 것을 선택하여 그 값을 적용하였다.

정밀한 1:5,000임상도가 구축되어 있음에도 세분류토지피복도를 이용하여 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량과 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 평가하는 이유는 다음과 같다. 지역 내에는 임상도에 포함되지 않은 공원 내 임목과 가로수, 녹지(완충녹지, 경관녹지, 주거지역 녹지 포함) 등 다양한 형태로 탄소흡수원이 분포하고 있다. 임상도는 세부적인 정보들을 포함하고 있지만 다양한 탄소흡수원의 표현에 있어 한계가 있다. 세분류토지피복도의 기타초지 항목은 다른 피복유형도 포함되는 경우도 있지만, 앞서 언급한 탄소흡수원들을 대부분 포함

하고 있다. 따라서 이를 반영한 CO<sub>2</sub> 흡수량을 공간적으로 표현하는데 적합하다. 또한 세분류토지피복도는 1:5,000임상도의 경계를 반영하고 구축 시기가 1:5,000임상도보다 늦기 때문에 비교적 최근의 경계가 설정되어 있다(MOE 2016). 따라서 세분류토지피복도에 대한 활용성 검토를 위해 1:5,000임상도를 이용한 통계적 검증을 실시하였다. 공간분석에 사용된 1:5,000임상도는 산림청에서 구축하였으며 경기도 지역은 2012년에 작성되었다. 세분류토지피복도는 환경부에서 구축한 공간자료로 2014년에 작성되었다. 분석에 사용된 프로그램은 ArcMap 10.4이며, 전체적인 연구흐름은 아래와 같다(Figure 2).

### III. 연구결과

#### 1. 통계자료를 이용한 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 분석

통계자료와 바이오매스 전환계수를 활용하여 산림 CO<sub>2</sub> 저장량을 산정하였다(Figure 3). 각 연도별로 산출된 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량은 축적차이법을 통해 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량으로 재산정하였다. 현재 산림기본통계는 5년 주기로 시행되는 국가산림자원조사를 기반으로 작성되고 있다. 2010년과 2015년 사이인 2011년~2014년 통계는 작성되지 않는다. 따라서 2010년

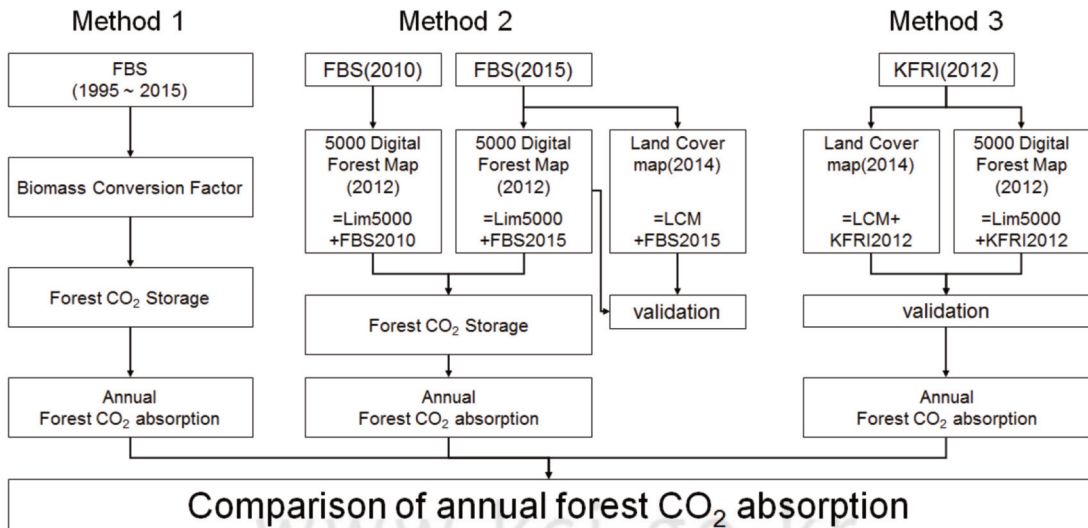


Figure 2. Study flow chart.

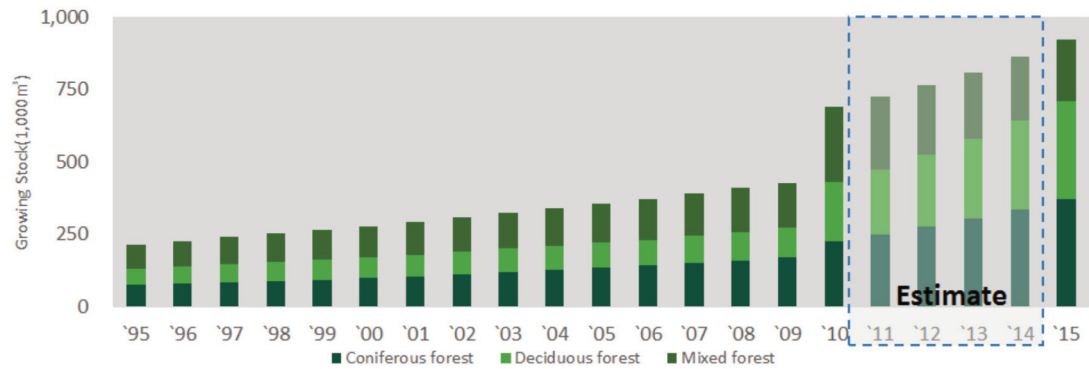
~2015년의 5년간 연평균증가량을 대입하여 2011년~2014년의 임목축적 및 산림 CO<sub>2</sub> 저장량을 추정하고 이를 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량으로 환산하였다.

산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 분석한 결과 2010년을 기준으로 대폭 상승하였다. 이는 산림기본통계(2010)에서 볼 수 있듯이 임목축적이 상승했기 때문이다. 제5차 국가산림자원조사부터 전국 산림에 고정표본점 설치 및 과학적 분석을 통해 임목축적을 산출한다(KFS 2010). 때문에 기존에 작성된 산림통계의 임목축적과 그 차이가 컸다. 이를 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량으로 비교해보면, 2008년~2009년 사이에 26,040 ton을 흡수한 반면, 2009년~2010년 사이에는 401,345 ton을 흡수한 것으로 나타나 그 차이가 명확하였다.

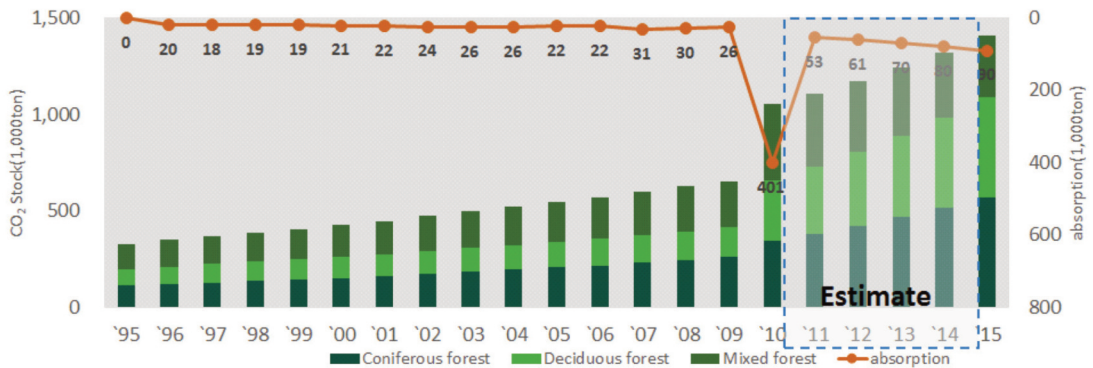
2010년을 기준으로 임목축적과, 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 차이를 살펴보았다. 안산은 1995년~2009년까지 임목축적이 연간 5.1% 증가했고, 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 증

가폭은 1.9%였다. 2010년~2015년까지의 임목축적은 연간 6.0% 증가했다. 임상별로 살펴보면 침엽수림과 활엽수림이 연간 10.5%, 10.7% 증가한 반면, 혼효림은 연간 4.2% 감소했다. 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 증가폭은 14.2%였다. 이때 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량의 증가폭은 2010년도를 제외한 2011년~2015년까지의 기간만을 이용하여 산출하였다. 2009년~2010년 동안 임목축적은 61.3% 증가하였고, 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량의 증가폭이 26,040 ton에서 401,345 ton으로 차이가 매우 컸기 때문이다. 통계자료와 바이오매스 전환계수를 이용하여 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 분석하는 것은 산림이 흡수하는 탄소량의 변화를 잘 보여준다. 하지만 위의 결과처럼 특정년도의 값이 급상승 할 경우 해석에 어려움이 있다. 과학적 방법을 통해 산출된 임목축적을 이용하여 과거년도를 보정할 수 있는 방안이 마련될 필요가 있다.

혼효림의 CO<sub>2</sub> 흡수량이 2010년을 기점으로 감소



(a) Growing stock (1,000m<sup>3</sup>)



(b) CO<sub>2</sub> stock & absorption by forest types (1,000ton)

Figure 3. Growing stock and CO<sub>2</sub> absorption.

Table 3. Forest area in accordance with different data (Unit : ha)

Forest types \ Area	Forest Basic Statistics			Spatial data		
	2010	2015	change	Lim5th	Lim5000	LCM
Coniferous forest	2,116	2,332	△ 216	1,593	1,604	1,582
Deciduous forest	1,868	2,467	△ 599	1,376	2,460	2,314
Mixed forest	2,270	1,360	▼ 910	1,681	435	441
Total	6,254	6,519	▼ 1,725	4,650	4,499	4,337

하였다. 이는 산림기본통계 작성의 기초자료 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 산림기본통계(2010)는 5차 국가산림자원조사, 최신임상도(5차임상도로 추정), 지자체와 산림청 소속기관에 보고된 행정자료를 기초로 작성된 반면, 산림기본통계(2015)는 6차 국가산림자원조사, 국토부 지적자료, 1:5,000임상도, 산지구분도, 산림기능구분도 등을 이용하여 작성되었다. 특히 1:5,000임상도의 구축으로 인해 보다 상세한 임상과 주요 수종에 대한 구분 작업이 가능해졌으며, 이런 특성으로 인해 과거 혼효림으로 분류되었던 임상 구획이 활엽수와 침엽수로 세분화되었을 가능성이 크다(NIFoS 2017).

통계자료 및 공간자료를 활용하여 연구지역 산림 면적을 비교하였다(Table 3). 이때 5차임상도를 추가하여 산림기본통계(2010)와 비교하였다. 그 결과 산림기본통계(2010)가 5차임상도에 비해 약 1,600ha가 더 많았고, 산림기본통계(2015)와 1:5,000임상도를 비교한 결과 산림기본통계(2015)가 약 2,000ha 많은 것으로 나타났다. 두 임상도 모두 풍도지역(약 120ha)이 포함되지 않은 면적이다. 산림기본통계(2015)와 1:5,000임상도의 활엽수 면적은 거의 일치하기도 했다. 세분류토지피복도는 풍도지역이 포함되어 있었지만 산림면적은 4,337ha로 가장 작았다. 산림면적의 차이는 CO<sub>2</sub> 흡수량 산정에 큰 영향을 미친다. 산림기본통계에서 임상별 면적이 변동되는 것은 기초자료의 차이 때문이라 할지라도, 통계자료와 공간자료의 면적 차이에 대한 면밀한 검토가 필요하다. Jeon et al. (2015)은 중분류토지피복도와 1:25,000임상도를 중첩하여 산림 구분 및 경계를 비교하였고, 그 결과 중분류토지피복도가 위성영상 자료를 기준으로 분류 항목을 결정하고 수정하였기 때문에 산림 구분에 대

한 오류가 있었다고 설명한 바 있다. 하지만 1:5,000임상도는 높은 완성도를 제고하기 위해 항공사진 판독과 현지 임상조사 및 표본점조사를 기초로 제작된다(KFRI 2008). 세분류토지피복도는 1:5,000임상도의 경계를 반영하고, 항공사진 등을 이용하여 비교적 최근의 토지이용 경계가 설정되어 있다(MOE 2016). 그렇기 때문에 풍도지역이 포함되었더라도 세분류토지피복도의 산림면적이 가장 낮은 것이다. 안산시를 대상으로만 비교하였기 때문에 이 같은 현상을 단정할 수 없지만, 추후 다양한 지역을 분석하여 1:5,000임상도와 세분류토지피복도의 산림면적 현황을 파악하고 나아가 통계자료와 공간자료의 면적 차이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

## 2. 공간자료를 이용한 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 분석

Lim5000+FBS2010 방법으로 도출된 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량은 총 1,155,596 ton이었고, 임상별로는 침엽수림 324,758 ton, 활엽수림 721,386 ton, 혼효림 109,452 ton으로 나타났다. Lim5000+FBS2015 방법으로 산정된 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량은 총 1,495,071 ton이었고, 임상별로는 침엽수림 424,118 ton, 활엽수림 928,991 ton, 혼효림 141,962 ton으로 나타났다. 5년간의 차이를 이용하여 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 도출하였다. 그 결과 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량은 67,895 ton이었고 임상별로는 침엽수림 19,872 ton, 활엽수림 41,521 ton, 혼효림 6,502 ton으로 나타났다. Lim5000+KFRI2012 방법으로 도출된 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량은 총 42,369 ton이며, 임상별로 침엽수림 10,912 ton, 활엽수림, 27,768 ton, 혼효림 3,689 ton으로 나타났다. LCM+KFRI2012 방법으로 도출된 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량은 총 40,696

Table 4. CO<sub>2</sub> stock & Annual CO<sub>2</sub> absorption of forest in accordance with different data (Unit : ton)

Forest_type \ data	Forest CO <sub>2</sub> stock		Forest annual CO <sub>2</sub> absorption		
	Lim5000 + FBS2010	Lim5000 + FBS2015	Lim5000 + (FBS15-10)/5	Lim5000 + KFRI2012	LCM + KFRI2012
Coniferous forest	324,758 (202.5)	424,118 (264.4)	19,872 (12.4)	10,912 (6.8)	11,727 (7.4)
Deciduous forest	721,386 (293.2)	928,991 (377.6)	41,521 (16.9)	27,768 (11.3)	24,966 (10.8)
Mixed forest	109,452 (251.6)	141,962 (326.3)	6,502 (14.9)	3,689 (8.5)	4,002 (9.1)
Total	1,155,596 (256.9)	1,495,071 (332.3)	67,895 (15.1)	42,369 (9.4)	40,696 (9.4)

( ) : ton/ha

ton이며, 임상별로 침엽수림 11,727 ton, 활엽수림, 24,966 ton, 혼효림 4,002 ton으로 나타났다.

Lim5000(FBS15-10)과 Lim5000+KFRI2012를 적용한 결과 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 차이는 25,526 ton이었다. 이는 CO<sub>2</sub> 흡수량 산출시 임목성장량에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수 능력이 반영되지 않은 결과로 추측된다. 수종에 따라 20년생 혹은 30년생을 기점으로 임령이 증가할수록 생장이 둔화되어 CO<sub>2</sub> 흡수 능력이 저하된다(KFRI 2012). 예컨대 중부지방소나무의 연간 단위면적당 임목성장량(m<sup>3</sup>/ha/yr)은, 10년생 2.62, 20년생 6.12, 30년생 7.92, 40년생 4.11, 50년생 2.10, 60년생 1.16으로 30년생 이후부터 임목성장량은 감소한다.

Table 5는 Lim5000+FBS2015과 Lim5000+FBS2010의 CO<sub>2</sub> 흡수량 차이를 계산하여 안산시에 분포하는 주요 수종들의 임령별 ha당 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 작성한 것이다. 전반적으로 KFRI (2012)의 자료보다 임령별 ha당 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량이 많게 나타났으며, 특히 중부지방소나무, 상수리나무, 신갈나무는 임령이 증가할수록 ha당 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 성장량에 따른 CO<sub>2</sub> 흡

수 능력이 반영되지 않은 결과로 바라볼 수 있고, 이 차이로 인해 Lim5000(FBS15-10) 방법이 Lim5000+KFRI2012를 적용한 것 보다 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 과대추정 하는 것으로 판단된다. 하지만 안산시 산림 중 주요 수종들이 차지하는 비율은 32.8%(낙엽송 0.7%, 리기다소나무 14.2%, 중부지방소나무 3.6%, 상수리나무 10.9%, 신갈나무 1.4%, 잣나무 2.0%)이며, 나머지 수종들은 임상별 평균값이 적용되었기 때문에 Lim5000+KFRI2012를 이용한 방법은 다소 한계는 있지만 일관된 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 산정 시 유용할 것으로 판단된다.

1:5,000임상도와 산림기본통계, KFRI (2012)의 자료를 활용하여 도출한 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량 및 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 지도로 작성하였다(Figure 4, Figure 5). 직관적인 패턴을 도출하기 위해 다양한 격자를 적용하였고, 그 결과 250m×250m 격자가 효과적이었다. 이때 1:5,000임상도를 1m 해상도의 래스터로 변환 후 250m 격자에 다시 입력함으로써 해상도 변화에 따른 데이터 손실을 최소화하였다. 그 결과, 임목축적에 따른 산림 CO<sub>2</sub> 저장량의 명확한 차이가 나타났고(Figure 4), 각각 도출된 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량

Table 5. Annual CO<sub>2</sub> absorption rate of major species (Unit : ton/ha/yr)

Species \ Age-Class	10	20	30	40	50	60
<i>Larix kaempferi</i>	0.0	0.0	10.4	9.5	0.0	0.0
<i>Pinus rigida</i>	0.0	-0.9	12.1	11.1	0.0	0.0
<i>Pinus densiflora</i>	0.0	0.0	18.3	16.8	24.8	52.3
<i>Quercus acutissima</i>	0.0	0.0	0.0	10.2	15.1	31.9
<i>Quercus mongolica</i>	0.0	0.0	19.6	18.0	26.7	0.0
<i>Pinus koraiensis</i>	0.0	-0.9	12.7	11.7	0.0	0.0

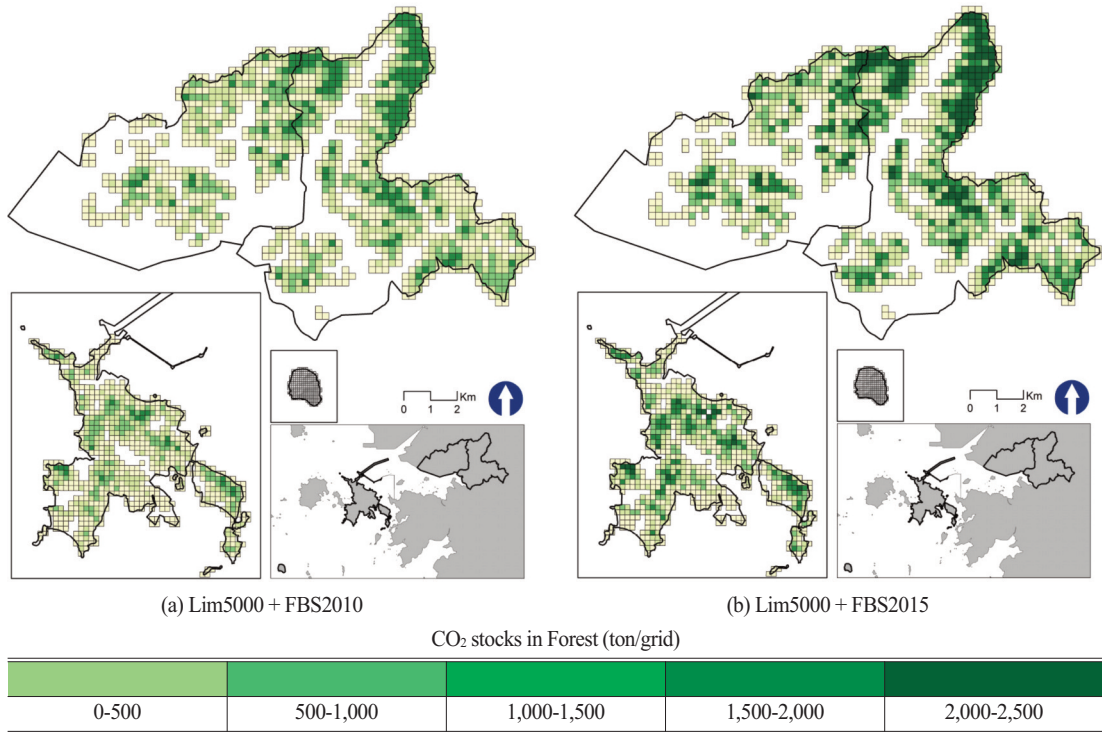


Figure 4. Map of Forest CO<sub>2</sub> stocks (250m × 250m).

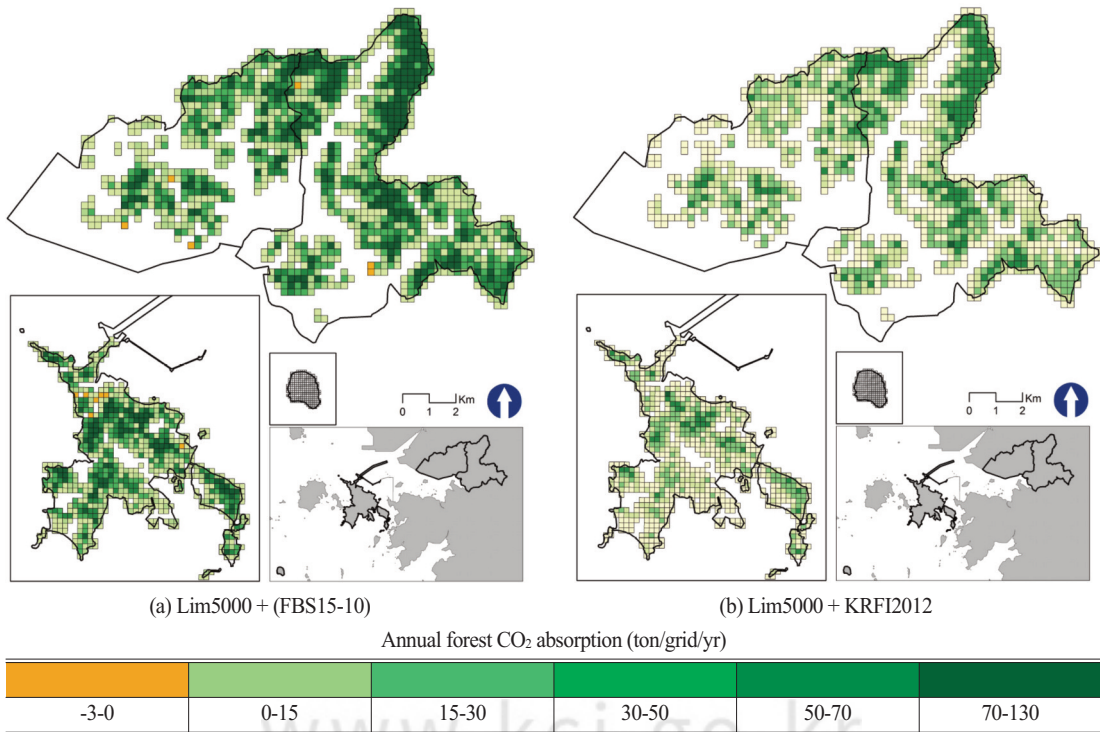


Figure 5. Map of annual CO<sub>2</sub> absorption by forest (250m × 250m).

결과는 그 차이를 공간적으로 잘 설명해주고 있다. Figure 5의 (a)에는 -3~0 값을 가지는 격자가 약 10 개정도 도출되었는데, 이는 격자 내에 10~20년생 수종들이 30~60년생 수종과 접하지 않은 채 계산된 결과이다. 또한 20년생은 2010년에 비해 2015년에 임목축적이 줄어들었기 때문이다.

### 3. 세분류토지피복도를 이용한 산림 CO<sub>2</sub> 흡수량 활용성 평가

세분류토지피복도의 활용성 평가를 위해 1:5,000 임상도를 이용한 통계적 검증을 실시하였다. 평가항목은 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량 및 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량이다. 세분류토지피복도와 임상별 임목축적(KFS 2015), 바이오매스 전환계수(GGIRCK 2016)를 통해 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량을 산정하였다(LCM+FBS2015).

앞서 작성된 지도(Figure 4, Figure 5)처럼 세분류토지피복도의 결과들도 격자에 입력하였다. 1:5,000임상도는 총 1,848개의 격자에 값이 입력되

어 있었고, 세분류토지피복도는 1,884개의 격자에 값이 있었다. 중첩되는 격자들을 추출한 결과 1,816 개의 격자가 도출되었고, 이를 활용하여 t-test를 실시하였다. 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량은 1:5,000임상도가 156,602 ton 더 많았고, 평균과 표준편차는 다소 차이가 있었다. R<sup>2</sup>는 0.9468, p<0.01 수준에서 유의한 것으로 나타났다. 연간 산림의 CO<sub>2</sub> 흡수량은 1:5,000임상도가 1,673 ton 더 많았고, 평균과 표준편차 모두 유사했다. R<sup>2</sup>는 0.9125, p<0.01 수준에서 유의한 것으로 나타났다(Table 6).

공간자료에 따른 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량 및 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 차이를 격자별로 분석하였다(Figure 6). 두 항목에서 붉은 계열로 나타나는 지역은 세분류토지피복도의 값들이 더 높게 산정된 지역이며, 푸른 계열로 나타나는 지역은 1:5,000임상도의 값들이 높게 산정된 곳이다. 풍도지역은 37개의 격자 내 CO<sub>2</sub> 값이 입력되어 있다. 1:5,000임상도에서 표현되지 않기 때문에 CO<sub>2</sub> 저장량은 36,978 ton, 연간 CO<sub>2</sub> 흡수

Table 6. T-test value for Lim5000 and LCM

Method	Result (ton)	N	Average	SD	R <sup>2</sup>	Sig
Lim5000 + FBS2015	1,495,071	1,816	821.2	680.1	0.9468	0.00**
LCM + FBS2015	1,338,469		715.4	604.6		
Lim5000 + KFRI2012	42,369		23.2	19.0	0.9125	0.00**
LCM + KFRI2012	40,696		21.8	18.4		

(\*\* p<0.01)

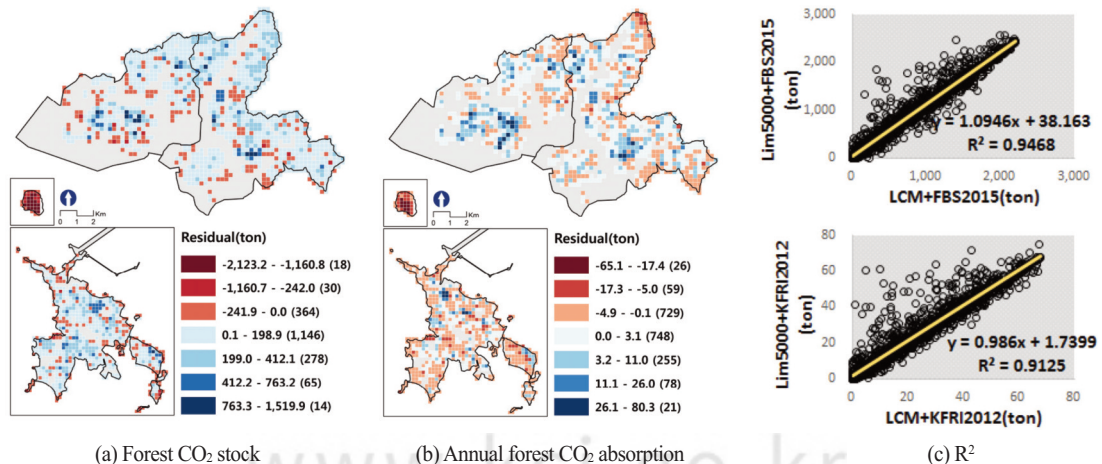


Figure 6. Differences in CO<sub>2</sub> stock and absorption per grid using dissimilar spatial data and its correlation.

Table 7. Annual average CO<sub>2</sub> absorption in accordance with different sets of data

Years	data	Forest Basic Statistics	Lim5000 (FBS15-10)/5	Lim5000 + KFRI2012	LCM + KFRI2012
1996-2009		23,327	-	-	-
2011-2015		70,933	67,895	-	-
Annual		-	-	42,369	40,696

량은 1,115 ton 차이가 났다. 풍도를 제외한 격자별 비율을 분석하였다. 세분류토지피복도에서 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량이 많이 산정된 격자는 365개(19.5%)였고, 1:5,000임상도는 1,503개(80.5%)였다. 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량은 세분류토지피복도 777개(41.4%), 1:5,000 임상도 1,102개(58.6%)로 CO<sub>2</sub> 저장량보다는 차이가 적었다.

#### 4. 자료별 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 비교

통계자료 및 공간자료 산출 결과를 이용하여 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정하였다(Table 7). 통계자료의 경우 1996년~2009년까지 연간 흡수량은 23,327 ton이었고, 2011년~2015년까지는 70,933 ton으로 2010년을 전후로 차이가 컸다. Lim5000+FBS2015와 Lim5000+FBS2010 차이를 이용하여 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정한 결과는 67,895 ton이었다. Lim5000+ KFRI2012는 연간 42,369 ton이었고, LCM+KFRI2012는 연간 40,696 ton으로 산정되었다.

각 방법별로 산정된 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 차이는 비교적 컸다. 특히 통계자료는 산림기본통계 작성 방법의 고도화로 인해 2009년과 2010년의 결과는 극명한 차이를 보였고 이로 인한 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량의 차이는 약 47,000 ton 정도였다. 통계자료와 임상별 바이오매스 전환계수를 이용한 방법은 산림이 흡수하는 탄소량의 흐름을 잘 보여준다. 하지만 과거년도의 CO<sub>2</sub> 흡수량을 평가할 경우 최근의 산림기본통계를 이용한 보정이 선행되어야 할 것이다. 산림기본통계(2015, 2010)의 시기 차이를 이용한 방법은 수종들의 성장량에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수 능력이 반영되지 않았다. 그 결과 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 과대 산정하였다. 따라서 공간자료를 활용한 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 산정은 Lim5000+KFRI2012 또는 LCM+KFRI2012 방법이 효과적임을 알 수 있었다.

한편 AGECE (2008)은 안산을 대상으로 온실가스 배출원 및 배출량에 대한 연구를 수행한 바 있다. 에너지, 산업공정, 폐기물, 농업, 산림부문을 대상으로 온실가스 배출량을 산정하였으며, 그 결과 2005년 기준 6,081,094 ton에 해당하는 CO<sub>2</sub>를 배출한다고 하였다. 이는 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량의 약 144배에 달하는 결과로 산림은 주요한 온실가스흡수원임에도 불구하고, 도시지역 배출량을 상쇄하기에는 큰 한계가 있다.

## IV. 결론

국내에서 산림의 CO<sub>2</sub> 저장량 분석에 대한 연구들은 지속적으로 수행되어 왔다. 하지만 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 평가하고 공간적으로 나타내는 연구는 미흡하였다. 이에 본 연구에서는 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정할 시 활용 가능한 자료들을 검토하였다. 이를 토대로 자료에 따른 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량의 차이와 원인을 고찰하였으며, 앞으로 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량의 평가 방향을 제시하였다. 이는 다양한 산림활동의 온실가스 감축 효과 평가에 있어 객관적 기준을 적용하는 일환으로 그 의의를 지닌다. 나아가 탄소흡수원과 관련된 토지이용 및 관리 등의 의사결정 지원을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

통계자료를 이용한 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량은 산림기본통계(2010)를 전후로 그 차이가 컸다. 산림기본통계(2010)은 제5차 국가산림자원조사를 기반으로 작성되었다. 제5차 국가산림자원조사부터는 전국 산림에 고정표본점 설치 및 과학적 분석을 통해 임목축적을 산출한다. 때문에 기존에 작성된 임목축적과는 차이가 컸다. 또한 산림기본통계(2015)는 1:5,000임상도 등 다양한 자료들을 활용하여 작성되었기 때문에 산림기본통계(2010)와 정보가 일치하지 않는 측면도

있었다. 향후 산림기본통계를 바탕으로 과거년도의 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정할 경우 최근의 자료를 바탕으로 한 보정이 필요할 것이다.

산림의 CO<sub>2</sub> 흡수량 분석을 위해 1:5,000임상도와 세분류토지피복도를 활용하였고, 그 결과를 도출할 수 있었다. 산림면적은 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정하는데 직접적인 영향을 미친다. 본 연구는 1:5,000임상도와 세분류토지피복도의 시간적 차이가 있어 이를 토지이용의 변화가 반영되었다는 가정아래 연구를 진행하였다. 하지만 최신 토지이용을 파악하여 그 변화를 반영한 연구가 진행되어야 한다.

본 연구에서 작성한 산림의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 지도는 도시공원, 완충녹지 등의 조성에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정하는데 적용할 수 있으며, 읍면동별 탄소흡수량 현황 등을 파악하여 탄소흡수원 증진에 관한 정책 지원에도 활용될 수 있다. 또한 산림이 지니는 탄소 흡수 조절서비스에 대한 가치 평가를 통해 그 중요성을 더욱 부각시켜, 탄소흡수원 조성을 통한 혜택을 사회·경제적으로 보여줄 수 있다.

안산의 경우, 2005년 기준 CO<sub>2</sub> 배출량은 6,081,094 ton으로 보고되었다(AGEC 2008). 본 연구에서 산정된 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량은 1:5,000임상도 기준 42,369 ton으로 CO<sub>2</sub> 배출량을 상쇄하기에는 부족하다. 하지만 도시공원, 신규 조림, 녹지 등 탄소흡수원의 조성을 통해 지속적으로 CO<sub>2</sub> 배출량을 상쇄하고, 나아가 CO<sub>2</sub> 배출량을 감소할 수 있는 정책도 함께 시행되어야 할 것이다.

향후 산림과 함께 다양한 탄소흡수원(공원, 주거단지, 가로수 등 녹지)을 대상으로 한 CO<sub>2</sub> 흡수량에 대한 연구가 필요하다. 이를 통해 각 지자체별 탄소흡수 조절서비스를 평가하고 전국 규모로 확장하는 것은 지역적·국가적 온실가스 감축 효과 평가에 중요한 기반이 될 것이다.

## 사 사

본 연구는 국립생태원(NIE)의 전략과제로 수행된 「생태계서비스 평가지도 구축」의 내용을 수정 및 개선하여 작성하였습니다.

## References

- AGEC (Ansan Green Environment Center). 2008. Study on Emission and Source of Greenhouse Gas in Ansan area. Ansan Green Environment Center, 1-184. [Korean Literature]
- AGEC (Ansan Green Environment Center). 2016. A roadmap for realization of Environmentally Friendly Ansan City : 2030 Ecological City Vision. Ansan Green Environment Center, 1-172. [Korean Literature]
- Ansan-si. 2015. Basic plan for urban forest creation and management, Ansan-si, 1-234. [Korean Literature]
- Cha SY, Pi UH, Park CH. 2013. Mapping and estimating forest carbon absorption using time-series MODIS imagery in South Korea. Korean Journal of Remote Sensing. 29(5): 517-525. [Korean Literature]
- Elmqvist T, Setälä H, Handel SN, Van Der Ploeg S, Aronson J, Blynnaut JN, De Groot R. 2015. Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. Current Opinion in Environmental Sustainability 14: 101-108.
- GGIRCK (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea). 2016. National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, 1-411. [Korean Literature]
- Hong JY, Shim CS, Lee MJ, Baek GH, Song WK, Jeon SW, Park YH. 2011. Net primary production changes over Korea and climate factors. Korean Journal of Remote Sensing. 27(4): 467-480. [Korean Literature]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. The

- Intergovernmental Panel on Climate Change, 1-590.
- Jeon SW, Kim JU, Jung HC. 2013. A Study on the Forest Classification for Ecosystem Services Valuation. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 16(3): 31-39. [Korean Literature]
- Jeon SW, Kim JU, Kim YH, Jung HC, Lee WK, Kim JS. 2015. Improvement of Forest Boundary in Landcover Classification Map(Level-II) for Functional Assessment of Ecosystem Services. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 18(1): 127-133. [Korean Literature]
- Jung JH, Nguyen HC, Heo J, Kim KM, Im JH. 2014. Estimation of Aboveground Forest Biomass Carbon Stock by Satellite Remote Sensing-A Comparison between k-Nearest Neighbor and Regression Tree Analysis. *Korean Journal of Remote Sensing*. 30(5): 651-664. [Korean Literature]
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2008. Guideline for the 1:5,000 Forest Type Map. Korea Forest Research Institute, 1-99. [Korean Literature]
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2012. Standard carbon removal of major forest species briefing memo. National Institute of Forest Science, 1-18. [Korean Literature]
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2012. Studies on the quantification of welfare functions of forests. Korea Forest Research Institute, 1-225. [Korean Literature]
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2015. Statistical analysis of National Forest Greenhouse Gas Using Carbon Emission Factors. Korea Forest Research Institute, 1-26. [Korean Literature]
- KFS (Korea Forest Service). 1995~2015. Forest Basic Statistics(Forest area & Growing stock). Korea Forest Service. [Korean Literature]
- KFS (Korea Forest Service). 2013. 5th Forest Basic Plan(revised). Korea Forest Service, 1-235. 1-107.[Korean Literature]
- KFS (Korea Forest Service). 2014. 1st Forest Carbon Sink Enhancement Plan. Korea Forest Service, [Korean Literature]
- Kim KM, Lee JB, Jung J. 2015. Comparison of Forest Carbon Stocks Estimation Methods Using Forest Type Map and Landsat TM Satellite Imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*. 31(5): 449-459. [Korean Literature]
- Kim KM, Roh YH, Kim ES. 2014. Comparison of three kinds of methods on estimation of forest carbon stocks distribution using national forest inventory DB and forest type map. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 17(4): 69-85. [Korean Literature]
- Kim SH, Jang DH, Yu JJ. 2016. Value Assessment Study for Erosion Control in Regulation Services of Ecosystems Services -A case study on Seocheon-. *Journal of Photo Geography* 26(1): 15-34. [Korean Literature]
- Laurin GV, Puletti N, Chen Q, Corona P, Papale D, Valentini R. 2016. Above ground biomass and tree species richness estimation with airborne lidar in tropical Ghana forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 52: 371-379.
- Lee BR, Kang WM, Kim CK, Kim GE, Lee CH. 2017. Estimating carbon uptake in forest and agricultural ecosystems of Korea and

- other countries using eddy covariance flux data. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 26(2): 127-139. [Korean Literature]
- Lee JH, Im JH, Kim KM, Heo J. 2015. Change Analysis of aboveground forest carbon stocks according to the land cover change using multi-temporal Landsat TM images and machine learning algorithms. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 18(4): 81-99. [Korean Literature]
- MA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Wellbeing Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press. Washington DC.
- MOE (Ministry of Environment). 2016. *Establishment of Land Cover Map(7th) and Improvement of National Environment Map System*. Ministry of Environment. [Korean Literature]
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2013. *Statistics of Coastal Wetland Area*. Ministry of Oceans and Fisheries. [Korean Literature]
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2016. *Main agreements of the Paris Agreement and the main contents of forest sector*. National Institute of Forest Science, 1-28. [Korean Literature]
- Park HJ, Shin HS, Roh YH, Kim KM, Park KH. 2012. Estimating forest carbon stocks in Danyang using kriging methods for aboveground biomass. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 15(1): 16-33. [Korean Literature]
- Rana P, Gautam B, Tokola T. 2016. Optimizing the number of training areas for modeling above-ground biomass with ALS and multispectral remote sensing in subtropical Nepal. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 49: 52-62.
- Roh YH, Kim CK, Hong HJ, 2016. Time-Series Changes to Ecosystem Regulating Services in Jeju: Focusing on Estimating Carbon Sequestration and Evaluating Economic Feasibility. *Journal of environmental policy* 24(2): 29-44. [Korean Literature]
- Schlund M, Scipal K, Davidson MW. 2017. Forest classification and impact of BIOMASS resolution on forest area and aboveground biomass estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 56: 65-76.
- Seo YO, Jung SC, Lee YJ. 2017. Mapping of Spatial Distribution for Carbon Storage in *Pinus rigida* Stands Using the National Forest Inventory and Forest Type Map: Case Study for Muju Gun. *Journal of Korean Forest Society*. 106(2): 258-266. [Korean Literature]
- Son YM, Lee SJ, Kim SW, Hwang JS, Kim RH, Park H. 2014. Mapping and Assessment of Forest Biomass Resources in Korea. *Journal of korean forest society* 103(3): 431-438.
- Song CH, Lee WK, Choi HA, Jeon SW, Kim JU, Kim JS, Kim JT. 2015. Application of InVEST Water Yield Model for Assessing Forest Water Provisioning Ecosystem Service. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(1): 120-134. [Korean Literature]
- TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). 2010. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological*

- and Economic Foundation, Kumar P.(Ed), Earthscan, London and Washington.
- Tian X, Yan M, van der Tol C, Li Z, Su Z, Chen E, Gao L. 2017. Modeling forest above-ground biomass dynamics using multi-source data and incorporated models: A case study over the qilian mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*. 246: 1-14.
- Yoo SJ, Lee WK, Son YW, Ito A. 2012. Estimation of Vegetation Carbon Budget in South Korea using Ecosystem Model and Spatio-temporal Environmental Information. *Korean Journal of Remote Sensing*. 28(1): 145-157. [Korean Literature]