

도시생태현황지도를 활용한 탄소저장량 추정 방법에 관한 연구

- 용인시 수지구 산림을 사례로 -

A Study on Carbon Stocks Estimation Methods Utilizing Both Biotope Maps

- A Case Study on Forests in Suji-gu, Yongin City -

이학기*, 한봉호**, 박석철***

*서울시립대학교 조경학과 박사수로, **서울시립대학교 조경학과 교수, ***서울시립대학교 도시과학연구원 연구원

Lee, Hak-Gi*, Han, Bong-Ho**, Park, Seok-Cheol***

*Ph.D. Candidate, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul

**Professor, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul

***Researcher, Institute of Urban Science, University of Seoul

Received: July 19, 2024

Revised: August 8, 2024 (1st)

August 29, 2024 (2nd)

Accepted: August 29, 2024

3인익명 심사됨

Corresponding author :

Bong-Ho Han

Professor, Dept. of Landscape
Architecture, University of Seoul,
Seoul 02504, Korea

Tel.: +82-2-6490-5521

E-mail: hanho87@uos.ac.kr

국문초록

현재 우리나라 산림의 탄소저장량을 산출하는 방법은 임목축적에 목재밀도, 바이오매스 확장계수, 탄소전환계수 등을 곱하여 산출하고 있으나 산림 식생을 충분히 반영하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구는 용인시 수지구 산림을 대상으로 도시생태현황지도와 바이오매스 상대생장식(이하 '상대생장식'이라고 한다)을 활용하여 탄소저장량 산출 방법을 제시하고자 하였다. 도시생태현황지도는 5년마다 작성되며 현존식생도, 토지피복현황도 등 식생에 대한 자세한 정보가 있다. 용인시 도시생태현황지도에서 수지구의 산림 비오톱을 추출하고, 용인시 24개 대표 산림 식생조사구(이하 '대표 조사구'라고 한다)의 수종, 수고, 흉고직경 등을 상세 분석하였다. 교목과 아교목의 탄소저장량 산출을 위해 국립산림과학원에서 개발한 상대생장식을 사용하였고, 관목의 탄소저장량 산출을 위해 기존 연구 결과인 m^2 당 0.457kg을 적용하였다. 우선 용인시 대표 조사구별로 탄소저장량을 산출하였고, 이를 전체 면적에 적용하기 위해 용인시 수지구의 125개 산림식생 유형을 50개로 재유형화 하였다. 그 결과 신갈나무군락이 가장 큰 면적을 차지하였으며, 리기다소나무군락, 상수리나무군락, 졸참나무군락 순이었다. 군락별 탄소저장량을 산출한 결과 단위면적(m^2)당 탄소저장량이 가장 많은 군락은 층층나무-신갈나무군락이었으며, 가장 적은 군락은 참나무-물박달나무군락이었다. 도시생태현황지도와 상대생장식을 적용하여 산출한 용인시 수지구 산림의 탄소저장량은 기존 임목축적에 목재밀도, 바이오매스 확장계수, 탄소전환계수 등을 곱하여 산출한 탄소저장량 보다 상대적으로 높았다. 이는 현재 공식적으로 사용되는 용인시 임목축적($144.44m^3/ha$)이 실제 산림의 식생을 충분히 반영하지 못하였고, 임목축적 조사 시 흉고직경 6cm 미만 규격의 수목이 제외되어 탄소저장량이 실제보다 낮게 산출되었던 것으로 판단되었다. 본 연구는 식생에 대한 상세한 정보가 있는 도시생태현황지도와 국립산림과학원에서 개발한 상대생장식을 활용하여 기존의 탄소저장량 산출 방법의 한계를 보완하고 보다 정밀도 높은 탄소저장량 산출 방법을 제시하는데 의의가 있다.

주제어: 바이오매스 상대생장식, 비오톱, 식생군락, 임목축적, 현존식생도

ABSTRACT

The current method of calculating the carbon stocks of Korea's forests is to multiply the forest standing crop by basic wood density, biomass expansion factor, and carbon fraction, but it does not sufficiently reflect forest vegetation. This study attempted to present a method of calculating carbon stocks using the biotope map and Biomass Allometric Equations for forests in Suji-gu, Yongin City. The biotope map is prepared every five years and contains detailed information on vegetation, including the actual vegetation and land cover status. The forest biotope of Suji-gu was extracted from the Yongin City biotope map, and the tree species, height, and breast height diameter of 24 representative types of forest vegetation sampled in Yongin City were analyzed in detail. To calculate the carbon stocks of trees and shrubs, the Biomass Allometric Equations developed by the National Institute of Forest Science was used, and to calculate the carbon stocks of shrubs, the previous research result of 0.457 kg per m^2 was applied. First, carbon storage was calculated for each types of forest vegetation sampled in Yongin City, and in order to apply this to the entire area, the 125 forest vegetation types in Suji-gu, Yongin City were retyped into 50. As a result, the *Quercus mongolica*

community occupied the largest area, followed by the *Pinus rigida* community, the *Quercus acutissima* community, and the *Quercus serrata* community. The community with the highest carbon stocks per unit area (m^2) was the *Cornus controversa*-*Quercus mongolica* community, and the community with the lowest was the oak-*Betula dahurica* community. The carbon stocks amount of forests in Suji-gu, Yongin City, calculated by applying the biotope map and Biomass Allometric Equations, was relatively higher than the carbon stocks amount calculated by multiplying existing forest standing crop by basic wood density, biomass expansion factor, and carbon fraction. This is because the currently officially used forest standing crop in Yongin City ($144.44 m^3/ha$) does not sufficiently reflect the actual forest vegetation, and trees with a breast height diameter of less than 6 cm were excluded when surveying forest standing crop, resulting in a lower carbon stocks amount than the actual amount. This study complements the limitations of existing carbon stocks calculation methods by utilizing a biotope map with detailed information on vegetation, such as existing vegetation maps and land cover status, and a Biomass Allometric Equations developed by the National Institute of Forest Science, and provides higher precision when assessing carbon stocks of forests. It is meaningful in suggesting a method for calculating carbon stocks.

Keywords: Biomass Allometric Equations, Biotope, Vegetation Community, Forest Standing Crop, Actual Vegetation Map

1. 서론

지난 100년간 인간의 온실가스 배출로 인해 지구의 온도는 $1.1^{\circ}C$ 상승하였으며, 2030년에는 $1.5^{\circ}C$ 에 도달할 것으로 예측되는 가운데 폭염, 폭우, 가뭄 등 복합적인 극한 현상의 증가로 33-36억 명의 사람들이 기후변화에 매우 취약한 상황에서 살고 있는 것으로 나타났다(IPCC, 2023). 국제사회는 기후변화 문제를 해결하기 위해 2015년 파리협정을 통해 2050년까지 탄소중립 목표를 제시하였고, 우리나라도 ‘2050 탄소중립 시나리오’를 통해 산림부문에서 2050년까지 온실가스 23.6백만 톤 CO_2eq 을 흡수할 계획이다(탄소중립위원회, 2021). EU는 2030년까지 1990년 대비 55%의 온실가스 감축 목표를 설정하였고, 이 중 10%는 산림과 목재의 온실가스 흡수와 저장을 목표로 제시하였다(국립산림과학원, 2021).

미국 등 해외 주요국은 산림의 탄소저장량 추정을 위해 원격탐사, GIS, 지구통계 및 환경변수 모델링 등 다양한 방법을 사용하고 있다(김경민 등, 2011). 우리나라는 크리깅 기법과 국가산림자원조사(National Forest Inventory) 자료, 위성영상, 1:5,000 임상도를 활용하여 탄소저장량을 산출하였다(김경민 등, 2014; 정재훈 등, 2014; 이정희 등, 2015; 김경민 등, 2015; 서연옥 등, 2017; 김성훈 등, 2018a; 신재원 등, 2023). 환경부(2022)는 산림지에서 탄소저장량을 산정하는 방법으로 2006 IPCC GL에서 제시한 의사결정도를 준용하여 Tier 2 수준으로 임목축적에 목재기본밀도(D), 바이오매스확장계수(BEF), 뿌리-지상부 비율(R), 탄소전환계수(CF) 등을 곱하여 산정한다. 2020년 기준 산림지 부문의 탄소흡수량은 40.5백만톤 CO_2eq 으로 LULUCF(Land Use, Land-Use Change and Forestry / 토지이용, 토지이용변화와 임업) 분야 흡수량의 98.8%를 차지하였다(환경부, 2022).

관련 연구 동향 분석에서 연구자별로 사례 연구대상지를 선정하여 탄소저장량을 산출하는 연구가 있었다. 박현주 등(2012)은 국가산림자원조사(National Forest Inventory)를 이용하여 단양군 산림의 탄소저장량을 추정하였다. 정현용 등(2013)은 임상도와 HyTAG 모형을 활용하여 용인시 산림의 탄소저장량과 변화량을 추정하고, 탄소저장량 변화는 수종 및 재적 생장과 밀접하다는 것을 확인하였다. 이상진 등(2022)은 국립공원공단의 자체 정밀식생도와 국립산림과학원의 상대생장식을 활용하여 우리나라 22개 국립공원의 탄소저장량을 산출하였다. 황진후 등(2022)은 세종특별자치시를 대상으로 InVEST(Integrated valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) Carbon 모형과 생태·자연도, 국토환경성평가지도, 도시생태현황지도를 활용하여 탄소저장량을 추정하였다. 연구 결과 개략적인 변화의 추세를 확인할 수 있었지만 정밀도 높은 탄소저장량 변화 추정에는 한계가 있다고 하였다(황진후 등, 2021). 산림의 탄소저장량 추정은 원격탐사, GIS, 지구통계 및 환경변수 모델링 등 자료의 종류, 품질, 신뢰성에 따라 정확성이 달라지는 한계가 있고, 환경공간정보를 활용한 자료의 정확도를 높이기 위해서는 현장조사 및 검증 과정이 필요하다고 하였다(김성훈 등, 2018b).

개별 수목의 성상, 수종, 규격을 활용한 탄소 흡수량 산정 연구로 조현길 등(1995)은 생체량방정식(Biomass equation)을 이용하여 자연지에서 관목층의 탄소저장량을 산출하였다. 한정수(2008)는 수도권매립지 121개 조사별

수목 개체 수, 평균 수고 및 평균 흉고직경을 활용하여 수목바이오매스 및 이산화탄소 흡수량을 산정하였다. 그 외 주요 조경수종을 대상으로 직접수확법에 의해 생체량을 산정하고, 수종별로 탄소저장 및 흡수를 계량화 할 수 있도록 회귀모델을 제시한 연구도 있었다(조현길과 안태원, 2012; 조현길 등, 2013; 조현길 등, 2014; 조현길 등, 2019). 국립산림과학원(2014)에서는 침엽수 8종, 낙엽활엽수 10종, 상록활엽수 4종의 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리 함량비 등 탄소배출계수와 흉고직경과 수고를 활용한 상대생장식을 개발하였다. 국립산림과학원(2019)은 임분수확표를 활용하여 주요 수종의 연간 이산화탄소 흡수량을 산정하였다.

우리나라 국가산림자원조사(National Forest Inventory)는 전국 산림을 조사·평가하여 산림정책의 근간이 되는 산림기본통계의 기초자료 확보 및 산림 생태계 건강성 평가를 위해 실시하는 조사로서 표본점은 전국 4,500개(4km × 4km)를 매년 900개소로 나누어 5년간 순환조사(<https://www.forest.go.kr/>)를 하고 있으나 우리나라 산림의 수종, 식생현황 등을 반영하는데 한계가 있다. 그리고 원격탐사, 환경공간정보를 활용하는 방법은 불확실성으로 정확한 산림 탄소저장량을 산정하는데 어려움이 있다. 비오톱은 공간적 경계를 가지는 특정 생물군집의 서식처를 말하며 비오톱 지도화(Biotope Mapping)는 자연생태 현황을 파악하기 위한 가장 좋은 방법이다(박석철, 2017). 도시생태현황지도는 특별시장, 광역시장, 특별자치시장, 특별자치도지사 또는 시장은 5년마다 5천분의 1 이상을 지도에 작성하여야 하며 현존 식생도, 토지피복현황도 등 식생에 대한 상세한 정보가 있어 상대적으로 정확한 산림 탄소저장량을 산출하는데 활용 가능성이 있다.

본 연구는 용인시 수지구 산림을 대상으로 직접수확법, 위성자료, 환경공간정보, 임목축적 등을 활용한 기존 연구의 탄소저장량 산출 방법의 한계를 보완하고 정밀도 높은 탄소저장량 산출을 위해 도시생태현황지도와 국립산림과학원(2014)에서 개발한 상대생장식을 활용하여 탄소저장량 산출 방법을 제시하고자 수행하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1 연구대상지

용인시는 북위 37° 04′ -37° 22′, 동경 127° 01′ -127° 25′ 로 한반도 중부지역에 위치하고 있으며, 수평적 산림대 기준으로 온대중부림에 해당된다. 용인시 수지구 면적은 42.1km², 수지구 산림 면적은 20.3km²이다(그림 1 참조). 용인시 전체 산림의 지형 및 사면별 식생 현황을 살펴보면 정상부는 떡갈나무와 소나무, 서어나무, 복사편은 신갈나무림, 층층나무림, 물박달나무림, 남사면은 굴참나무림, 졸참나무림, 산림 주연부는 상수리나무림, 리기다소나무림, 밤나무림 등이 분포하였다(용인시, 2021). 2020년 기준 용인시의 산림면적 비율은 50.6%로 경기도의 산림면적 비율 50.2%와 비슷하며 최근 급속한 도시화 및 개발로 인하여 경기도 화성시, 파주시, 이천시 등과 함께 난개발과 산림훼손이 심각한 지역이다. 용인시 산림의 평균 임목 축적은 ha당 144.44m³로, 경기도 평균 임목 축적 ha당 158.28m³보다 낮았다(<https://kosis.kr/>).

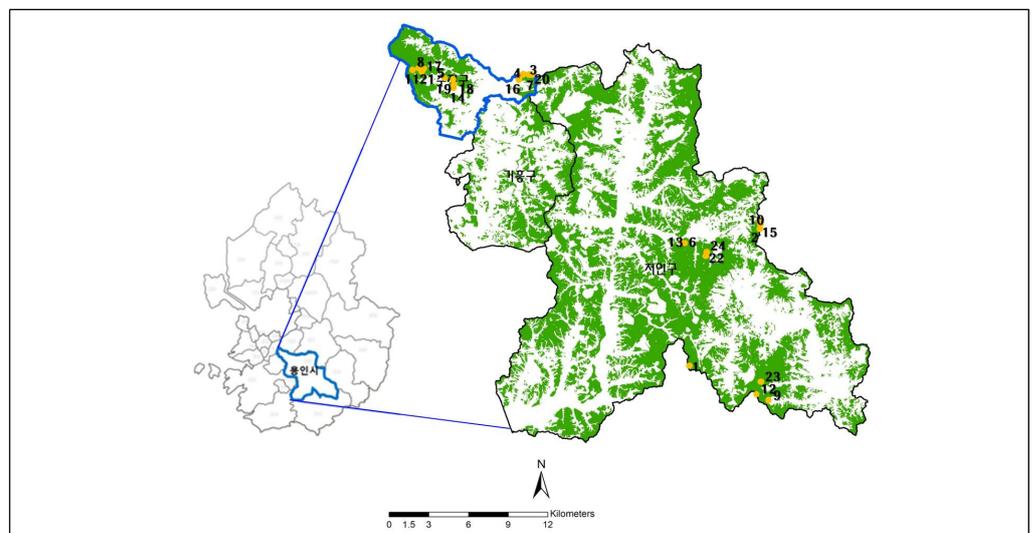


그림 1. 연구대상지 위치도

범례: 수지구 산림 군집조사구

2.2 연구방법

2.2.1 연구체계

용인시 수지구 산림의 탄소저장량을 산출하기 위해서 2021년 용인시에서 제작한 도시생태현황지도를 활용하였다. 용인시 수지구의 전체 비오톱 중 산림 비오톱을 추출하여 신갈나무군락, 리기다소나무군락 등 125개의 산림 군락으로 구분하였고, 용인시의 소분류 산림 비오톱 유형 중 면적비율이 1% 이상의 산림식생 군락과 생태적으로 보전 가치가 높은 대표 산림식생군락 24개소를 선정하였다. 대표 산림식생군락 구조는 Monk et al.(1969)의 방법을 참고하여 방형구법(quadrat method)으로 조사하였다. 조사구 크기는 10m × 10m-20m × 20m 크기로 설정하였다. 식물군집구조 조사는 각 조사구 내에 출현하는 수종을 대상으로 교목 및 아교목층은 흉고직경 2cm 이상 수종의 흉고직경(cm)과 수고(m)를 조사하였다. 관목층은 수고(m), 지하고(m), 수관폭(m×m)을 조사하였다. 임목축적은 일정한 토지면적에 포함되어 있는 나무줄기의 부피를 말하는데 흉고직경 6cm 이상의 나무만 포함된다. 본 연구에서는 대표 조사구별로 「2023 임목재적·바이오매스 및 임분수확표」의 임목재적수간표를 활용하여 산출하였다. 임목축적 산출은 교목과 아교목을 대상으로 하였고 흉고직경이 6cm 미만인 수종에 대해서는 수간표를 적용할 수 있는 최소 흉고직경인 6cm로 하였다.

탄소저장량 선정식은 도시생태현황지도의 활용가능성과 산출결과의 신뢰성, 정확성 등을 고려하여 선정하였고, 선정된 탄소저장량 선정식을 활용하여 대표 조사구 24개소의 탄소저장량을 산정하였다. 전체 산림식생 군락에 탄소저장식을 적용할 수 있도록 125개 식생군락을 「2023 임목재적·바이오매스 및 임분수확표」의 부록 '재적표에 없는 수종의 현 재적표 적용 기준' 등을 활용하여 유형화하였다(그림 2 참조).

2.2.2 탄소저장량 선정식 선정

임목축적을 활용하는 방법은 현재 우리나라에서 산림 탄소저장량을 산출하는 방법으로 산출 결과가 과소평가 될 수 있고, 직접 수확법은 정확도는 가장 높지만 현실적으로 적용이 어려운 방법이다. 도시생태현황지도는 「자연환경 보전법」에 따라 특별시장·광역시장·특별자치시장·특별자치도지사 또는 시의 장이 5년마다 작성하여야 하며, 2024년 7월 기준 서울시, 인천시, 용인시를 포함하여 전체 84개 시 중 77개 시는 작성 완료되었다. 도시생태현황지도를 작성하기 위해서 수치지형도, 항공사진, 도시계획도, 지적도, 생태자연도, 임상도, 토지피복지도, 국토환경성평가지도 등을 기초자료 및 참고자료로 활용하고 현장조사를 병행한다. 따라서, 도시생태현황지도는 임상도, 생태자연도, 국가환경평가지도 등 다른 환경공간정보 보다 자료의 정확도가 높으며, 시 단위 이상의 지자체에서 법적으로 5년마다 작성·갱신 하여야 하는 의무가 있어 기존 자료를 활용할 수 있는 장점이 있다(표 1 참조).

바이오매스 상대생장식은 식물의 상대생장관계를 통해 각 부분의 값을 추정하는 방법으로 수종별 바이오매스 상대생장식에 의한 탄소흡수/저장량 평가는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)가 제시하는 탄소계정의

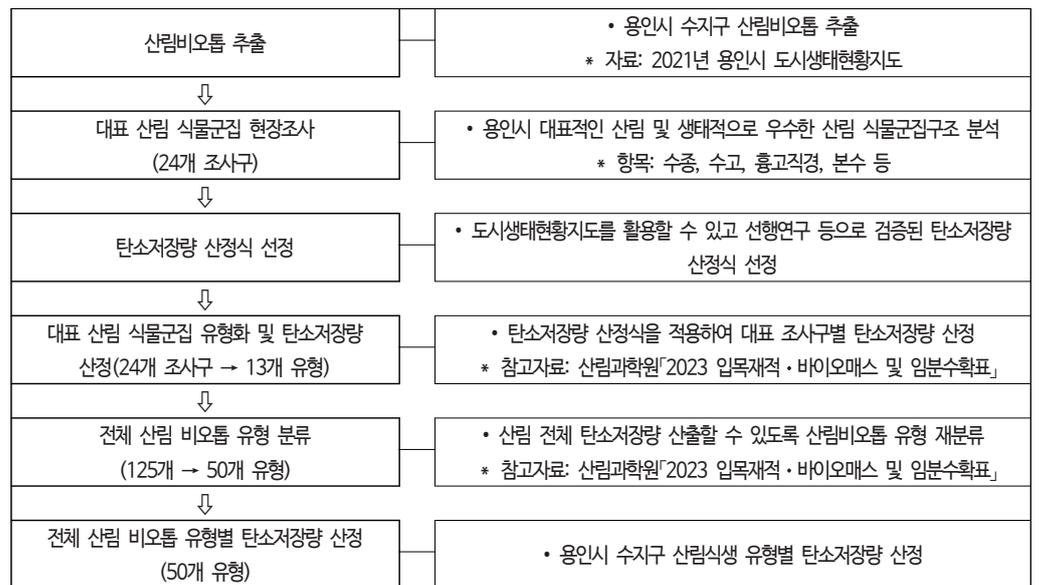


그림 2. 연구 수행 체계도

표 1. 탄소저장량 산출을 위한 자료 비교

활용자료	특징	검토의견
도시생태현황지도	<ul style="list-style-type: none"> 교목, 아교목, 관목 등 층유별 상세 식생조사 시 단위 5년마다 작성 	<ul style="list-style-type: none"> 상대생장식을 활용하여 상대적으로 정확한 탄소저장량 산출 가능
임목축적, 국가산림자원조사	<ul style="list-style-type: none"> 흉고직경 6cm 이상 수목만 식생조사 우리나라 산림 탄소저장량 산출 활용 전국 4,500개소 표본지 순환조사 	<ul style="list-style-type: none"> 산림의 탄소저장량 과소 평가 표본지가 적어 정확한 산림식생현황 반영 어려움
환경공간정보 (생태자연도, 국토환경성평가지도 등)	<ul style="list-style-type: none"> 대면적의 탄소저장량 산출 가능 정확도는 낮음(현장조사 필요) 	<ul style="list-style-type: none"> 산출결과 신뢰도 낮고 변동성 큼
직접 수확법	<ul style="list-style-type: none"> 수목 개별 산출로 정확도 높음 	<ul style="list-style-type: none"> 대면적 산출 시 현실 적용 어려움

Tier 3 수준으로 국가 통계 작성에 있어 국제적 신뢰도를 확보할 수 있다(IPCC, 2006). 국립산림과학원(2014)에서 개발한 상대생장식은 흉고직경을 이용하는 방법(방법 1)과 흉고직경, 수고를 이용하는 방법(방법 2)이 있다. 도시생태현황지도에서는 교목과 아교목은 흉고직경과 수고가 조사되어 있어 상대생장식에서 흉고직경과 수고를 활용하는 방법 2의 적용이 가능하며 방법 1보다 산출결과에 대한 신뢰도가 높을 것으로 판단하였다. 상대생장식 적용은 수목의 줄기, 가지, 잎, 뿌리로 나누어 산출이 되며 본 연구에서는 줄기, 가지, 뿌리의 탄소저장량을 산출하고 계절적 영향을 받는 잎은 제외하였다. 관목은 기존의 연구결과에 따라 제곱미터당 0.457kg를 적용하였다(조현길 외, 1995).

1. 교목, 아교목(개체)의 탄소저장량 산정식

- 바이오매스량 산정(상대생장식)

(방법1) 바이오매스량 = aD^b

(방법2) 바이오매스량 = aD^bH^c

- * a, b : 상수, D : 흉고직경

- * a, b, c : 상수, D : 흉고직경, H : 수고

- * 상대생장식이 없는 수종은 「2023 입목재적·바이오매스 및 임분수확표」의 부록 '재적표에 없는 수종의 현 재적표 적용 기준'을 활용하여 대체 수종을 찾아 상대생장식을 적용

- 탄소저장량 = 바이오매스량 × CF

- * CF : 탄소전환계수(침엽수 0.51, 활엽수 0.48)

2. 관목(m²당)의 탄소저장량 산정식

- 탄소저장량 = 0.457kg/m²

3. 대표 조사구 탄소저장량 산정식

- 대표 조사구 탄소저장량(kg) = 조사구 내 교목·아교목 탄소저장량(kg) + 관목류 탄소저장량(0.457kg/m²)

2.2.3 대상지 전체 탄소저장량 산정 방법

용인시 수지구 산림의 탄소저장량은 2021년에 작성된 도시생태현황지도와 국립산림과학원에서 개발한 상대생장식을 활용하여 산림의 바이오매스량을 산정하고 탄소전환계수(침엽수 0.51, 활엽수 0.48)를 곱하여 산정하였다. 국립산림과학원(2014)의 상대생장식이 적용 가능한 수목은 소나무, 신갈나무 등 22종으로 용인시 대표 조사구 24개소의 상대생장식 적용을 위해서는 조사된 수목에 대한 재분류가 필요하였다. 용인시 수지구 산림 내 교목과 아교목은 총 28종으로 상대생장식 적용이 가능한 수종은 굴참나무, 리기다소나무, 밤나무, 상수리나무, 소나무, 신갈나무, 일본잎갈나무, 잣나무, 졸참나무, 서어나무 등 10종이며, 상대생장식 적용이 어려운 18종은 국립산림과학원(2023)의 「2023 입목재적바이오매스 및 임분수확표」의 부록 '재적표에 없는 수종의 현 재적표 적용 기준'을 적용하여 상대생장식을 적용할 수 있도록 재분류 하였다. 전나무는 일본잎갈나무를 적용하였고, 스트로브잣나무는 소나무를 적용하였다. 물오리나무, 단풍나무, 갈참나무, 떡갈나무, 뽕나무, 버드나무, 뽕나무, 은사시나무, 자작나무, 백합나무, 층층나무는 신갈나무를 적용하였고, 느티나무, 아까시나무, 물박달나무, 오리나무, 물푸레나무는 상수리나무를 적용하였다(표 2 참조). 24개의 대표 조사구의 탄소저장량을 산출 후 2개 이상의 동일한 군락은 탄소저장량을 합한 후 평균값을 적용하여 최종적으로 13개 대표 조사구의 탄소저장량과 단위면적(m²)당 탄소저장량을 산출할 수 있었다. 대표 조사구에서 산출된 탄소저장량을 활용하여 용인시 수지구 산림의 125개 식생 군락의 탄소저장량을 산출하기 위해서 50개의 식생유형으로 재분류되었다(부록 1 참조). 군락의 구분은 전국자연환경조사 지침(국립생태원, 2021)에

표 2. 상대생장식 적용을 위한 주요수종 적용표

우점종, 적용수종	우점종, 적용수종	우점종 → 적용수종
전나무 → 일본잎갈나무	벚나무 → 신갈나무	층층나무 → 신갈나무
스트로브잣나무 → 소나무	버드나무 → 신갈나무	느티나무 → 상수리나무
물오리나무 → 신갈나무	뽕나무 → 신갈나무	아까시나무 → 상수리나무
단풍나무 → 신갈나무	은사시나무 → 신갈나무	물바달나무 → 상수리나무
갈참나무 → 신갈나무	자작나무 → 신갈나무	오리나무 → 상수리나무
떡갈나무 → 신갈나무	백합나무 → 신갈나무	물푸레나무 → 상수리나무

*「2023 입목재적·바이오매스 및 임분수확표」부록 '재적표에 없는 수종의 현 재적표 적용 기준'을 재구성

따라 교목층의 수종 중 식피율이 30% 이상이 되는 수종을 우점종으로 하였으며 우점종이 2개 이상인 경우 동일한 식피율을 갖는 것으로 하였다.

재분류 된 50개 산림유형 중 대표 조사가 있는 13개 군락은 산출된 탄소저장량을 그대로 적용하였고, 그 외 군락은 우점종의 비율을 고려하여 탄소저장량을 산출하였다. 예를 들어 대표 조사가 없는 신갈나무-상수리나무 군락의 m²당 탄소저장량은 대표 산림식생군락인 신갈나무 군락의 m²당 탄소저장량과 상수리나무 군락의 m²당 탄소저장량을 1/2씩 합하여 산출하였다. 나머지 재분류된 식생군락에 대해서도 아래와 같은 산출방법과 동일한 방법으로 산출하였다.

1. 신갈나무-상수리나무군락 m²당 탄소저장량 산출 예시

$$\bullet \text{ 탄소저장량} = (\text{신갈나무군락 m}^2\text{당 탄소저장량})/2 + (\text{상수리나무군락 m}^2\text{당 탄소저장량})/2$$

2. 리기다소나무-소나무-신갈나무군락 m²당 탄소저장량 산출 예시

$$\bullet \text{ 탄소저장량} = (\text{리기다소나무군락 m}^2\text{당 탄소저장량})/3 + (\text{소나무군락 m}^2\text{당 탄소저장량})/3 + (\text{신갈나무군락 m}^2\text{당 탄소저장량})/3$$

용인시 수지구 산림의 산출된 탄소저장량을 비교하기 위해서 우리나라에서 산림지 탄소저장량을 산출하는 방법인 2006 IPCC GL에서 제시한 의사결정도를 준용하였다. 용인시 산림의 임목축적(<https://kosis.kr/>)에 목재기본밀도(D), 바이오매스확장계수(BEF), 뿌리-지상부 비율(R), 탄소전환계수(CF) 등을 곱하여 탄소저장량을 산출하였다. 용인시 수지구 산림의 통계자료가 없어서 용인시 전체 산림의 2020년 평균 임목축적 144.44m³/ha를 적용하였고, 임상별 비율은 침엽수림 30.0%, 활엽수림 36.7%, 혼효림 33.3%를 적용하였다(산림청, 2021).

□ 탄소저장량 산정식

$$\bullet \text{ 탄소저장량(t C)} = \text{임목축적(m}^3\text{/ha)} \times D \times \text{BEF} \times (1+R) \times \text{CF} \times \text{산림면적}$$

D : 목재기본밀도(침엽수 0.46, 활엽수 0.68), BEF : 바이오매스확장계수(침엽수 1.43, 활엽수 1.51),
 R : 뿌리-지상부 비율(침엽수 0.27, 활엽수 0.36), CF : 탄소전환계수(침엽수 0.51, 활엽수 0.48)

3. 결과 및 고찰

3.1 수지구 산림식생 현황

용인시 수지구 산림 면적은 20,366,889.8m²으로 산림식생 군락은 125개로 구분되었다. 아래 표는 면적분포 비율이 높은 20개 군락의 면적과 비율을 제시하였다. 신갈나무군락이 4,851,899.4m²로 가장 큰 면적을 차지하였고, 리기다소나무군락 2,409,534.3m², 상수리나무군락 1,236,800.5m², 졸참나무군락 1,133,760.7m², 굴참나무군락 1,102,516.8m², 일본잎갈나무군락 759,200.4m², 굴참나무-신갈나무군락 532,259.3m², 밤나무군락 472,112.7m², 신갈나무-굴참나무군락 445,332.7m², 졸참나무-신갈나무군락 372,512.0m² 순이었다. 식생이 없는 무입목지의 면적은 305,629.8m²로 1.5%를 차지하였다. 소규모로 분포하고 있는 105개 산림식생 군락은 20.7%를 차지하였다. 기타 군락 중 산림 법면은 99,199.1m²로 0.5%, 갈참나무, 졸참나무, 상수리나무, 신갈나무 등 참나무류가 혼재되어 있는 참나무군락은 23,042.9m², 서어나무군락은 19,296.7m²로 각각 0.1%의 면적 비율을 차지하였다. 용인시 수지구의 산림

은 신갈나무, 상수리나무, 졸참나무 등 참나무류가 우점하고 있으며 리기다소나무, 일본잎갈나무, 밤나무가 주로 인공림으로 조성된 것으로 파악되었다(표 3 참조, 그림 3 참조).

3.2 대표 조사구별 탄소저장량 산정

용인시 대표 조사구 24개소의 식물군집구조를 정밀 분석하였다. 대표 조사구별로 우점종, 조사구 면적, 층위별 본수, 흉고직경 분포를 파악하였다. 대표 조사구는 떡갈나무-밤나무군락, 상수리나무군락 2개소, 굴참나무군락 4개소, 졸참나무군락 2개소, 신갈나무군락 2개소, 참나무-물박달나무군락, 밤나무군락, 리기다소나무군락 3개소, 잣나무군락, 일본잎갈나무군락, 서어나무군락 3개소, 소나무군락 2개소, 층층나무-신갈나무군락이 조사되었다. 조사구 면적은 떡갈나무-밤나무군락 등 23개소 군락이 개소당 400㎡였으며, 잣나무군락은 100㎡였다(표 4 참조). 조사구 4-7은 굴참나무군락으로 4개 군락의 평균 본수는 교목층 35.5본, 아교목층 27본, 관목층 70본으로 나타났으며, 평균 종수는 13.5종으로 교목층과 아교목층의 평균 흉고직경은 20-30cm 미만인 22.5본으로 가장 많이 분포하였다. 조사구 10과 11은 신갈나무군락으로 2개 군락 평균 본수는 교목층은 19.5본, 아교목층은 11본, 관목층은 88본이었으며, 평균 종수는 13종으로 나타났다. 조사구 14-16 리기다소나무군락의 평균 본수는 교목층 46.7본, 아교목층

표 3. 용인시 수지구 산림 현존식생 유형별 면적 및 비율

유형	현존식생 유형	면적(㎡)	비율(%)	유형	현존식생 유형	면적(㎡)	비율(%)
1	신갈나무	4,851,899.4	23.822	12	굴참나무-졸참나무	337,565.8	1.657
2	리기다소나무	2,409,534.3	11.831	13	신갈나무-졸참나무	320,713.9	1.575
3	상수리나무	1,236,800.5	6.073	14	무입목지	305,629.8	1.501
4	졸참나무	1,133,760.7	5.567	15	소나무-신갈나무	288,732.6	1.418
5	굴참나무	1,102,516.8	5.413	16	상수리나무-졸참나무	264,660.8	1.299
6	일본잎갈나무	759,200.4	3.728	17	졸참나무-밤나무	263,140.0	1.292
7	굴참나무-신갈나무	532,259.3	2.613	18	소나무	259,409.9	1.274
8	밤나무	472,112.7	2.318	19	굴참나무-상수리나무	219,360.7	1.077
9	신갈나무-굴참나무	445,332.7	2.187	20	신갈나무-밤나무	215,266.1	1.057
10	졸참나무-신갈나무	372,512.0	1.829	21	기타(소규모 분포)	4,217,979.9	20.709
11	졸참나무-굴참나무	358,501.5	1.760		계	20,366,889.8	100.00

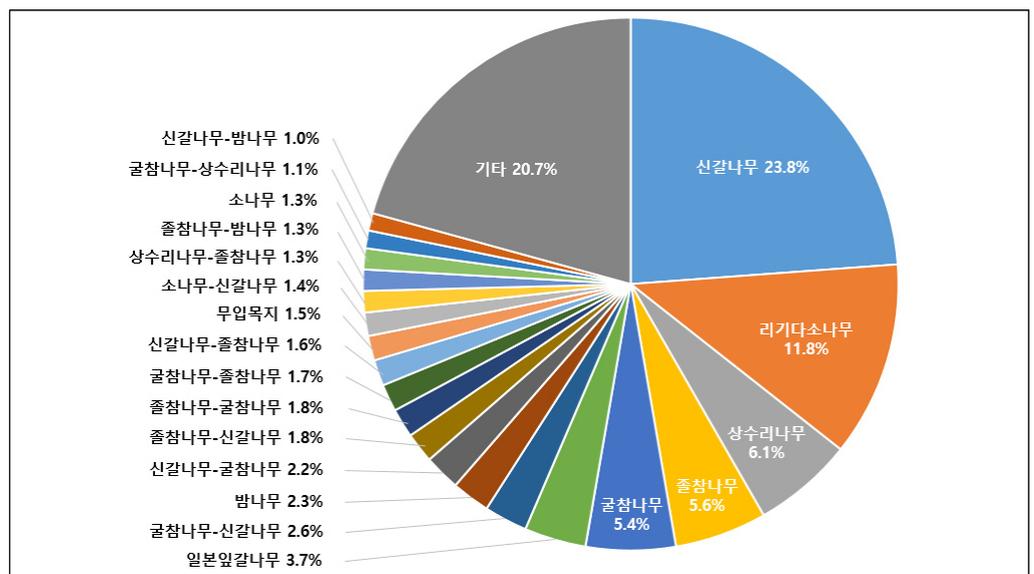


그림 3. 용인시 수지구 산림 현존식생 분포 현황

표 4. 용인시 대표 조사구별 식생구조 현황

조사지	우점종	조사구 면적(㎡)	본 수				종 수				흉고직경분포(cm)				
			계	교목층	아교목층	관목층	계	교목층	아교목층	관목층	40 이상	30-40 미만	20-30 미만	10-20 미만	10 미만
1	떡갈나무-밤나무	400	111	25	30	56	13	4	8	8	2	4	15	11	23
2	상수리나무	400	63	13	10	40	14	1	6	9	6	5	4	5	3
3	상수리나무	400	130	28	38	64	12	6	10	5	-	1	14	31	20
-	평균	400	96.5	20.5	24	52	18.5	3.5	8	7	3	3	9	18	11.5
4	굴참나무	400	98	36	34	28	11	2	9	4	4	2	19	17	28
5	굴참나무	400	165	32	25	108	18	5	8	11	-	4	24	12	17
6	굴참나무	400	122	40	14	68	7	3	5	4	-	5	25	14	10
7	굴참나무	400	145	34	35	76	18	6	8	12	-	3	22	20	24
-	평균	400	132.5	35.5	27	70	13.5	4	7.5	7.8	1	3.5	22.5	15.8	19.8
8	졸참나무	400	202	8	6	188	15	4	2	13	3	4	1	3	3
9	졸참나무	400	108	15	17	76	11	4	7	5	1	5	7	3	16
-	평균	400	155	11.5	11.5	132	13	4	4.5	9	2	4.5	4	3	9.5
10	신갈나무	400	86	18	12	56	9	1	4	7	-	6	10	9	5
11	신갈나무	400	151	21	10	120	17	5	3	12	-	4	14	5	8
-	평균	400	118.5	19.5	11	88	13	3	3.5	9.5	-	5	12	7	6.5
12	참나무-물박달나무	400	171	19	28	124	21	7	9	14	-	-	18	3	26
13	밤나무	400	102	12	14	76	22	4	8	15	4	5	4	9	4
14	리기다소나무	400	246	55	35	156	12	1	8	8	-	1	34	23	32
15	리기다소나무	400	112	32	8	72	9	5	6	3	-	6	22	10	2
16	리기다소나무	400	224	53	43	128	18	3	12	10	-	-	37	31	28
-	평균	400	194	46.7	28.7	118.7	13	3	8.7	7	-	2.3	31	21.3	20.7
17	갯나무	100	67	22	1	44	8	3	1	5	-	-	9	13	1
18	일본잎갈나무	400	111	27	20	64	11	1	7	8	1	15	9	7	15
19	서어나무	400	39	19	4	16	9	5	1	4	2	4	12	3	2
20	서어나무	400	75	25	10	40	7	4	2	4	1	5	19	6	4
21	서어나무	400	78	17	5	56	13	5	4	7	4	3	7	5	3
-	평균	400	64	20.3	6.3	37.3	9.7	4.7	2.3	5	2.3	4	12.7	4.7	3
22	소나무	400	162	51	15	96	9	4	4	7	3	3	27	19	14
23	소나무	400	173	36	25	112	24	1	9	18	4	13	18	2	24
-	평균	400	167.5	43.5	20	104	16.5	2.5	6.5	12.5	3.5	8	22.5	10.5	19
24	층층나무-신갈나무	400	66	6	16	44	14	5	5	7	4	5	3	5	5

28.7본, 관목층 118.7본이었으며, 평균 종수는 13종으로 나타났다. 교목층과 아교목층의 평균 흉고직경은 10cm 미만이 20.7본, 10-20cm 미만이 21.3본, 20-30cm 미만이 31본, 30-40cm 미만이 2.3본이었고 흉고직경 40cm 이상은 출현하지 않았다. 조사구 19-21 서어나무군락의 평균 본수는 총 64본으로 교목층 20.3본, 아교목층 6.3본, 관목층 37.3본이었으며 평균 종수는 9.7종으로 나타났다.

굴참나무군락과 리기다소나무군락, 갯나무군락에서 교목과 아교목의 밀도가 높았으며 밤나무군락과 일본잎갈나무군락, 소나무군락, 층층나무-신갈나무군락은 다른 군락보다 흉고직경 30cm 이상의 수목이 많이 분포하고 있는 것으로 확인되었다. 리기다소나무군락과 갯나무군락, 일본잎갈나무군락의 교목층 종수가 상대적으로 적은 것은 인공 조림과 타감작용으로 다른 수종의 생장을 억제한 것으로 추정되었다.

용인시 대표 조사구의 탄소저장량을 산출하기 위해 대표 조사구 24개 중 동일한 군락은 각 군락별 탄소저장량을 산출 후 평균값으로 산출하여 최종적으로 13개 대표 조사구로 분류하였고, 조사구별 탄소저장량은 단위면적(㎡) 당 탄소저장량으로 환산하였다. 임목축적은 대표 조사구(100-400㎡)별로 산출하였고 재적표에 없는 수종은 「2023

입목재적·바이오매스 및 입분수확표」 부록의 '재적표에 없는 수종의 현 재적표 적용 기준'에 따라 적용하였다. 상수리나무군락은 단위면적당 22,177kg의 탄소를 저장하고 있었으며, 굴참나무군락은 16,630kg로 산출되었다. 졸참나무군락의 탄소저장량은 4,904.685kg으로 단위면적당 탄소저장량은 12,262kg으로 산출되었고, 신갈나무군락의 탄소저장량은 4,632.693kg으로 단위면적당 11,582kg이 산출되었다. 리기다소나무군락의 탄소저장량은 6,927.545kg으로 단위면적당 17,319kg으로 나타났으며, 일본잎갈나무군락의 탄소저장량은 9,708.234kg으로 단위면적당 24,271kg의 탄소가 저장되었다. 서어나무군락과 소나무군락의 단위면적당 탄소저장량은 각각 16,425kg, 15,968kg이었다. 단위면적당 가장 탄소저장량이 많은 군락은 층층나무-신갈나무군락이었으며 가장 탄소저장량이 적은 군락은 참나무-물박달나무군락이었다. 흉고직경 30cm 이상 수목이 많은 밤나무, 일본잎갈나무군락, 층층나무-신갈나무군락과 인공 조림으로 수목밀도가 높은 리기다소나무군락, 잣나무군락의 단위면적당 탄소저장량이 높은 것으로 나타났다.

입목축적은 일본잎갈나무군락이 단위면적(400㎡)당 26.99㎡로 가장 높았으며 졸참나무군락이 7.74㎡로 가장 낮게 산출되었다. 면적이 가장 넓은 신갈나무군락은 입목축적이 9.05㎡로 나타났고 리기다소나무군락은 16.91㎡로 나타났다. 층층나무-신갈나무군락 등 활엽수림 군락은 입목축적에 비해 탄소저장량이 높은 것으로 나타났고, 리기다소나무 군락 등 침엽수림 군락은 입목축적에 비해 탄소저장량이 낮은 것으로 나타났다. 용인시 산림의 2020년 평균입목축적은 ha당 144.44㎡(400㎡당 5.78㎡)로 용인시 대표 조사구별 입목축적 조사결과와 비교하면 실제 산림의 입목축적보다 낮게 산출된 것으로 판단되었다(표 5 참조, 그림 4 참조).

표 5. 용인시 대표 조사구별 탄소저장량 및 입목축적 산출

군락	우점종	조사구 면적 (㎡)	탄소저장량(kg)			입목축적* (㎡)	단위면적당 탄소저장량(kg/㎡)
			계	교목·야교목	관목		
1	떡갈나무-밤나무	400	7,315.462	7,132.662	182.8	11.87	18.289
2	상수리나무	400	8,870.987	8,688.187	182.8	12.45	22.177
3	굴참나무	400	6,652.213	6,469.413	182.8	14.84	16.630
4	졸참나무	400	4,904.685	4,721.885	182.8	7.74	12.262
5	신갈나무	400	4,632.693	4,449.893	182.8	9.05	11.582
6	참나무-물박달나무	400	4,265.880	4,083.080	182.8	7.83	10.665
7	밤나무	400	7,106.182	6,923.382	182.8	11.42	17.765
8	리기다소나무	400	6,927.545	6,744.745	182.8	16.91	17.319
9	잣나무	100	1,815.182	1,769.482	45.7	5.43	18.152
10	일본잎갈나무	400	9,708.234	9,525.434	182.8	26.99	24.271
11	서어나무	400	6,569.911	6,387.111	182.8	10.66	16.425
12	소나무	400	6,387.181	6,204.381	182.8	16.07	15.968
13	층층나무-신갈나무	400	12,215.633	12,032.833	182.8	16.42	30.539

*「2023 입목재적·바이오매스 및 입분수확표」의 수간재적표를 활용하여 400㎡당 입목축적 산출

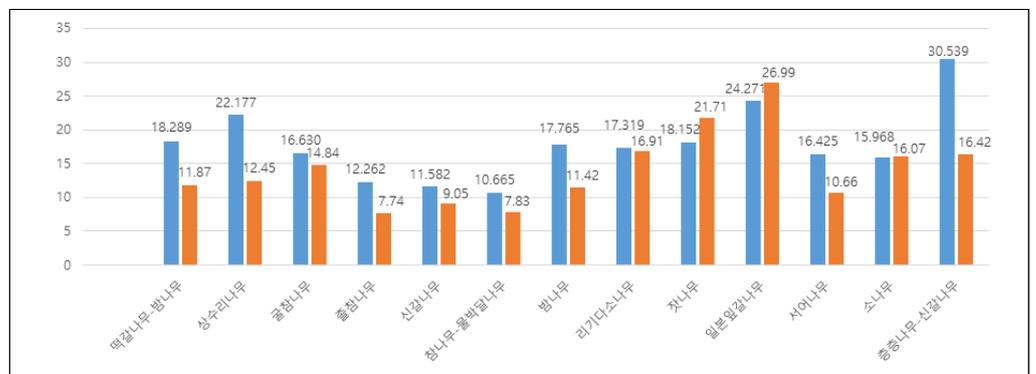


그림 4. 대표 조사구별 탄소저장량(㎡당) 및 입목축적(400㎡당) 산출 그래프

범례: ■ 탄소저장량(kg) ■ 입목축적량(㎡)

3.3 탄소저장량 산출을 위한 군락 유형 재분류

용인시 대표 산림조사구 13개소의 탄소저장량을 수지구 전체 산림에 적용하기 위해 용인시 수지구 산림식생 군락 125개를 50개 유형으로 재분류 하였다. 갈참나무, 갈참나무-은사시나무, 물오리나무, 신갈나무, 신갈나무-떡갈나무, 자작나무, 층층나무-물오리나무 군락 등은 신갈나무군락으로 분류하였다. 느티나무, 상수리나무, 상수리나무-아까시나무, 아까시나무, 아까시나무-상수리나무 군락은 상수리나무군락으로 분류하였다. 신갈나무-졸참나무, 신갈나무-졸참나무-갈참나무, 졸참나무-신갈나무 군락 등은 신갈나무-졸참나무군락으로 분류하였다. 갈참나무-아까시나무, 상수리나무-갈참나무, 상수리나무-신갈나무, 신갈나무-물박달나무, 신갈나무-상수리나무, 아까시나무-신갈나무, 조경수식재지(느티나무, 단풍나무) 등은 신갈나무-상수리나무군락으로 분류하였다. 관목식재지, 산림 법면, 산림벌채지는 관목류 군락으로 구분하였다. 갈참나무-상수리나무-졸참나무, 참나무-갈참나무-상수리나무, 참나무류(졸참나무, 신갈나무, 상수리나무) 군락 등은 졸참나무-신갈나무-상수리나무군락으로 분류하였다. 일본잎갈나무-아까시나무 군락 등은 상수리나무-일본잎갈나무군락으로 구분하고 신갈나무-소나무-물박달나무 군락은 신갈나무-소나무-상수리나무군락으로 분류하였다(부록 1 참조).

3.4 탄소저장량 산정 종합고찰

용인시 수지구 산림식생 군락 125개소의 탄소저장량을 산출하기 위해 50개로 유형화 한 결과 신갈나무군락의 면적은 5,176,748.2㎡이며 면적비율은 25.42%로 가장 큰 면적을 차지하였고, 탄소저장량은 59,724,553.934kg이며 전체 탄소저장량의 19.57%를 차지하였다. 리기다소나무군락의 면적은 2,409,534.3㎡이며 면적비율은 11.83%로 나타났다, 탄소저장량은 41,518,606.484kg으로 전체 탄소저장량의 13.60%를 차지하였다. 상수리나무군락의 면적은 1,666,019.8㎡로 면적비율은 8.18%이며, 탄소저장량은 36,819,427.827kg으로 전체 탄소저장량의 12.06%를 차지하였다. 졸참나무군락의 면적은 1,133,760.7㎡이고 면적비율은 5.57%이며, 탄소저장량은 13,847,688.244kg으로 전체 탄소저장량의 4.54%였다. 굴참나무군락의 면적은 1,102,516.8㎡, 탄소저장량은 18,270,884.986kg으로 면적비율과 탄소저장량 비율은 각각 5.41%와 5.99%로 나타났다. 굴참나무-신갈나무군락의 면적은 1,001,452.4㎡, 탄소저장량은 14,100,578.579kg으로 면적비율과 탄소저장량 비율은 각각 4.92%와 4.62%로 나타났다. 신갈나무-졸참나무군락은 810,204.7㎡로 면적비율은 3.98%로 나타났으며, 탄소저장량은 9,631,460.621kg으로 전체 탄소저장량에 3.16%였다. 일본잎갈나무군락은 760,606.6㎡, 탄소저장량은 18,333,805.924kg으로 면적과 탄소저장량 비율은 각각 3.73%와 6.01%로 산출되었다. 졸참나무-굴참나무군락의 면적은 696,067.3㎡, 탄소저장량은 9,998,997.249kg으로 면적과 탄소저장량 비율은 각각 3.42%와 3.28%였다. 밤나무군락의 면적은 472,112.7㎡로 면적비율은 2.32%였으며, 탄소저장량은 8,346,294.317kg으로 전체 탄소저장량의 2.73%를 차지하였다. 관목류군락의 면적은 280,479.5㎡, 탄소저장량은 128,179.132kg으로 면적 및 탄소저장량의 비율은 각각 1.38%와 0.04%로 나타나 면적대비 탄소저장량이 상대적으로 낮았다. 온대중부지방 극상림인 서어나무군락의 면적은 19,296.7㎡로 316,948.298kg의 탄소를 저장하고 있었으며 면적과 탄소저장량 비율은 각각 0.09%와 0.10%였다. 용인시 수지구 산림의 총 면적은 20,366,889.8㎡로 조사되었으며 탄소저장량은 305,240,113.715kg으로 산출되었다(표 6 참조, 그림 5 참조).

표 6. 용인시 수지구 산림식생 군락별 탄소저장량 산출

조사지	군락명	토지면적 (㎡)	비율 (%)	탄소저장량 (kg)	비율 (%)	조사지	군락명	토지면적 (㎡)	비율 (%)	탄소저장량 (kg)	비율 (%)
1	신갈나무	5,176,748.2	25.42	59,724,553.934	19.57	26	신갈나무-일본잎갈나무	77,888.8	0.38	1,396,312.518	0.46
2	리기다소나무	2,409,534.3	11.83	41,518,606.484	13.60	27	굴참나무-밤나무	75,184.0	0.37	1,258,655.344	0.41
3	상수리나무	1,666,019.8	8.18	36,819,427.827	12.06	28	굴참나무-소나무	55,041.7	0.27	890,496.615	0.29
4	졸참나무	1,133,760.7	5.57	13,847,688.244	4.54	29	리기다소나무-소나무	54,359.4	0.27	900,208.144	0.29
5	굴참나무	1,102,516.8	5.41	18,270,884.986	5.99	30	소나무-졸참나무	53,635.9	0.26	743,402.224	0.24
6	굴참나무-신갈나무	1,001,452.4	4.92	14,100,578.579	4.62	31	리기다소나무-일본잎갈나무	37,559.5	0.18	779,876.272	0.26
7	신갈나무-졸참나무	810,204.7	3.98	9,631,460.621	3.16	32	밤나무-소나무	35,331.4	0.17	586,648.987	0.19
8	일본잎갈나무	760,606.6	3.73	18,333,805.924	6.01	33	일본잎갈나무-졸참나무	35,217.3	0.17	643,314.419	0.21
9	졸참나무-굴참나무	696,067.3	3.42	9,998,997.249	3.28	34	밤나무-갯나무	30,460.4	0.15	547,038.324	0.18

표 6. 계속

조사지	군락명	토지면적 (㎡)	비율 (%)	탄소저장량 (kg)	비율 (%)	조사지	군락명	토지면적 (㎡)	비율 (%)	탄소저장량 (kg)	비율 (%)
10	밤나무	472,112.7	2.32	8,346,294.317	2.73	35	졸참나무-신갈나무-상수리나무	28,443.3	0.14	430,725.902	0.14
11	신갈나무-소나무	468,533.9	2.31	6,431,653.292	2.11	36	리기다소나무-밤나무	24,739.5	0.12	432,394.245	0.14
12	밤나무-신갈나무	434,785.1	2.13	6,344,128.605	2.08	37	밤나무-일본잎갈나무	22,987.3	0.11	483,147.071	0.16
13	상수리나무-졸참나무	401,146.6	1.97	6,897,887.053	2.26	38	상수리나무-소나무	20,040.4	0.10	381,297.127	0.12
14	밤나무-졸참나무	361,376.4	1.77	5,347,594.967	1.75	39	서어나무	19,296.7	0.09	316,948.298	0.10
15	신갈나무-상수리나무	349,963.9	1.72	5,845,834.880	1.92	40	갯나무-상수리나무	17,707.7	0.09	357,075.771	0.12
16	무입목지	305,629.8	1.51	0.000	0.00	41	굴참나무-졸참나무-갯나무	14,961.5	0.07	234,611.282	0.08
17	리기다소나무-신갈나무	286,830.2	1.41	4,111,315.299	1.35	42	상수리나무-일본잎갈나무	13,271.9	0.07	308,226.606	0.10
18	밤나무-상수리나무	281,365.9	1.38	5,552,584.685	1.82	43	신갈나무-갯나무-졸참나무	13,092.7	0.06	177,301.343	0.06
19	관목류	280,479.5	1.38	128,179.132	0.04	44	리기다소나무-소나무-신갈나무	13,009.8	0.06	194,574.569	0.06
20	굴참나무-상수리나무	275,761.7	1.35	5,247,364.683	1.72	45	굴참나무-졸참나무-소나무	12,243.9	0.06	183,083.037	0.06
21	소나무	266,383.7	1.31	4,219,961.305	1.38	46	신갈나무-갯나무	12,039.2	0.06	177,195.712	0.06
22	굴참나무-리기다소나무	216,785.4	1.06	3,672,195.612	1.20	47	굴참나무-갯나무	8,784.3	0.04	152,767.761	0.05
23	갯나무	192,671.9	0.95	3,456,471.745	1.13	48	신갈나무-소나무-상수리나무	6,055.6	0.03	100,377.626	0.03
24	리기다소나무-졸참나무	163,969.5	0.81	2,406,961.159	0.79	49	소나무-갯나무	5,990.7	0.03	99,463.592	0.03
25	리기다소나무-상수리나무	160,690.3	0.79	3,125,676.878	1.02	50	굴참나무-일본잎갈나무	4,149.6	0.02	84,863.470	0.03
							계	20,366,889.8	100.00	305,240,113.715	100.00

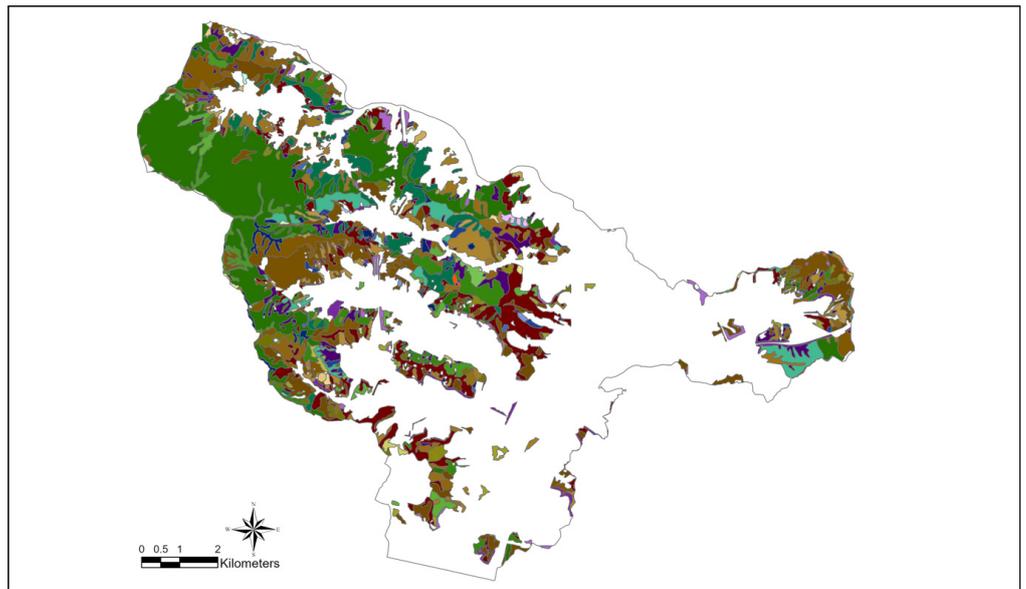


그림 5. 용인시 수지구 탄소저장량 산출을 위한 산림식생 군락 재분류 현황도

범례 (군락명)

- | | | | |
|-------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 1. 신갈나무 | 2. 리기다소나무 | 3. 상수리나무 | 4. 졸참나무 |
| 5. 굴참나무 | 6. 굴참나무-신갈나무 | 7. 신갈나무-졸참나무 | 8. 일본잎갈나무 |
| 9. 졸참나무-굴참나무 | 10. 밤나무 | 11. 신갈나무-소나무 | 12. 밤나무-신갈나무 |
| 13. 상수리나무-졸참나무 | 14. 밤나무-졸참나무 | 15. 신갈나무-상수리나무 | 16. 무입목지 |
| 17. 리기다소나무-신갈나무 | 18. 밤나무-상수리나무 | 19. 관목류 | 20. 굴참나무-상수리나무 |
| 21. 소나무 | 22. 굴참나무-리기다소나무 | 23. 갯나무 | 24. 리기다소나무-졸참나무 |
| 25. 리기다소나무-상수리나무 | 26. 신갈나무-일본잎갈나무 | 27. 굴참나무-밤나무 | 28. 굴참나무-소나무 |
| 29. 리기다소나무-소나무 | 30. 소나무-졸참나무 | 31. 리기다소나무-일본잎갈나무 | 32. 밤나무-소나무 |
| 33. 일본잎갈나무-졸참나무 | 34. 밤나무-갯나무 | 35. 졸참나무-신갈나무-상수리나무 | 36. 리기다소나무-밤나무 |
| 37. 밤나무-일본잎갈나무 | 38. 상수리나무-소나무 | 39. 서어나무 | 40. 갯나무-상수리나무 |
| 41. 굴참나무-졸참나무-갯나무 | 42. 상수리나무-일본잎갈나무 | 43. 신갈나무-갯나무-졸참나무 | 44. 리기다소나무-소나무-신갈나무 |
| 45. 굴참나무-졸참나무-소나무 | 46. 신갈나무-갯나무 | 47. 굴참나무-갯나무 | 48. 신갈나무-소나무-상수리나무 |
| 49. 소나무-갯나무 | 50. 굴참나무-일본잎갈나무 | | |

용인시 도시생태현황지도(용인시, 2021)와 상대생장식(국립산림과학원, 2014)을 활용하여 탄소저장량을 산출한 결과와 비교하기 위해 용인시 평균 임목축적을 활용하여 용인시 수지구 산림의 탄소저장량을 산출한 결과 163,669,038kg으로 산출되었다. 도시생태현황지도를 활용하여 산출된 탄소저장량과 비교하여 탄소저장량은 54% 수준으로 나타났으며 차이가 크게 나는 이유는 첫째, 2020년 기준 용인시 임목축적은 400m²당 5.78m³로 본 연구에서 조사된 대표 산림식생 군락별 임목축적 7.74~26.99m³보다 낮아 실제 산림의 임목축적을 반영하지 못하였고, 둘째, 임목축적은 흉고직경 6cm 이상의 수목만 조사하여 흉고직경 6cm 미만의 수목은 반영되지 않았기 때문에 판단되었다. 다만, 도시생태현황지도를 활용한 탄소저장량 산정의 정확성을 높이기 위해서는 산림식생 유형별로 대표 조사구를 추가하고 상대생장식을 적용할 수 있는 수준의 확대 등이 필요한 것으로 판단되었다(표 7 참조).

4. 결론

우리나라 산림의 탄소저장량 산출은 임목축적과 국가산림자원조사(National Forest Inventory)를 기반으로 하여 산출하고 있으나 전국 4,500개의 표본점을 5년에 나누어 걸쳐 순환조사하고 있어 표본이 적고 수종, 식생현황을 반영하는데 한계가 있다. 도시생태현황지도를 수치지형도, 항공사진, 생태자연도, 임상도, 토지피복도 등을 기초자료로 활용하고, 현장조사를 병행하고 있어 다른 환경공간정보보다 자료의 정확도가 높고 시 단위 이상의 지자체에서 5년 마다 작성해야 하기 때문에 조사된 자료를 활용할 수 있는 장점이 있다.

용인시 수지구 산림의 탄소저장량을 산출하기 위해 2021년에 작성된 도시생태현황지도를 활용하여 125개의 산림식생 군락을 추출하였다. 용인시 수지구의 면적은 42.10km²이며 이 중 산림의 면적은 약 20.7km²이다. 국립산림과학원(2014)에서 개발한 상대생장식을 활용하여 대표 조사구 24개소의 바이오매스량을 산출하였고, 탄소전환계수(CF)를 곱하여 대표 조사구별로 탄소저장량을 산출하였다. 대표 조사구 중 동일한 군락은 각각의 군락 탄소저장량을 합한 후 평균값을 사용하여 최종적으로 13개로 분류하였고, 관목의 탄소저장량은 기존 연구에서 단위면적당 산출된 탄소저장량을 활용하여 m²당 0.457kg으로 적용하였다. 대표 조사구에서 산출된 탄소저장량을 활용하기 위해 125개의 산림식생 군락을 50개로 재분류하여 탄소저장량을 산출하였다. 대표 조사구가 있는 신갈나무군락, 상수리나무군락, 잣나무군락 등 13개 군락은 산출된 탄소저장량을 그대로 적용하였고, 그 외 군락은 우점종의 비율을 고려하여 탄소저장량을 산출하였다.

용인시 도시생태현황지도와 국립산림과학원(2014)의 상대생장식을 활용하여 용인시 수지구 산림식생 20,366,889.8m²의 탄소저장량을 산출한 결과 총 305,240,113.715kg으로 산출되었다. 산출된 탄소저장량을 비교하기 위해 2020년 기준 임목축적에 목재밀도, 바이오매스 확장계수, 탄소전환계수 등을 곱하여 산출한 결과 탄소저장량은 163,669,038kg으로 54% 수준이었다. 이는 첫째, 대표 조사구별로 임목축적을 산출한 결과 ha당 193.5~674.75m³로 현재 공식적으로 사용되는 용인시 산림의 임목축적 ha당 144.44m³보다 높은 것으로 나타났다. 둘째, 도시생태현황지도는 교목, 아교목, 관목 등 층위별로 식생현황이 상세히 조사된 것에 비하여 임목축적은 흉고직경 6cm 이상의 수목만 조사되어 6cm 미만의 수목은 탄소저장량 산출에서 제외되었기 때문이라고 판단되었다.

표 7. 탄소저장량 산출 방법에 따른 결과 비교

구분	도시생태현황지도 활용	임목축적 활용
활용자료	용인시 도시생태현황지도(용인시, 2021)	용인시 평균 임목축적(https://kosis.kr/)
산정방법	국립산림과학원(2014) 상대생장식 수고(H), 흉고직경(D) 활용	목재기본밀도(D), 바이오매스 확장계수(BEF) 등 탄소 배출계수 활용
면적	20,366,889.8m ²	20,366,889.8m ²
탄소저장량	305,240,114kg	163,669,038kg
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 교목, 아교목, 관목 등 상세한 식생조사 • 5년마다 시(자치구 포함) 단위 조사 • 산림 유형별 상세 식생조사구 확대 필요 • 상대생장식 활용 수종(22종) 확대 및 관목류의 탄소 저장량 산출방법 개발 필요 • IPCC 제시 Tier 3 수준 	<ul style="list-style-type: none"> • 흉고직경 6cm 이상 수목만 조사 • 전국 4,500개 표본점을 5년에 나누어 순환조사(국가 산림자원조사) • 현재 우리나라에서 산림 탄소저장량을 산출하는 방법으로 상대적으로 산출방법이 간단 • IPCC 제시 Tier 2 수준

도시생태현황지도는 5년마다 군단위를 제외하고 전국적으로 5천분의 1 이상의 지도를 작성하여야 하며 현존식생도, 토지피복현황도 등 식생에 대한 상세한 정보가 있어 임목축적과 국가산림자원조사(National Forest Inventory)를 기반으로 하는 우리나라 산림지 탄소저장량 산출방법 뿐만 아니라 원격탐사, GIS, 지구통계 및 환경변수 모델링 등의 방법보다 신뢰성과 정확성이 높고 기존 자료를 활용함으로써 적용이 용이할 것으로 판단된다. 다만, 정확한 탄소저장량 산출을 위해서는 산림식생 유형별로 상세 조사구 확대와 식생조사 시 수고와 흉고직경 등의 정확한 측정을 위해 라이더 영상 등을 활용할 필요가 있다. 또한, 현재 국립산림과학원(2014)에서 개발한 상대생장식을 적용할 수 있는 수종의 확대와 관목 식생의 탄소저장량을 산출할 수 있는 연구가 추가로 필요하다.

References

1. 국립산림과학원(2014) 한국 주요 수종별 탄소배출계수 및 바이오매스 상대생장식. 국립산림과학원.
2. 국립산림과학원(2019) NIFOS 산림정책이슈 제129호 주요 산림수종의 표준 탄소흡수량(ver. 1.2). 국립산림과학원.
3. 국립산림과학원(2021) 국제산림정책토포픽 제109호 2030 EU 신산림전략의 시사점. 국립산림과학원.
4. 국립산림과학원(2023) 「2023」 임목재적·바이오매스 및 임분수확표. 국립산림과학원.
5. 국립생태원(2021) 제5차 전국자연환경조사 지침. 국립생태원.
6. 김정민, 노영희, 김은숙(2014) 국가산림자원조사 DB와 임상도를 이용한 산림탄소저장량 공간분포 추정방법. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17(4): 69-85.
7. 김정민, 이정빈, 김은숙, 박현주, 노영희, 이승호, 박기호, 신휴석(2011) 원격탐사와 GIS 기반의 산림탄소저장량 추정에 관한 주요국 연구동향 개관. *한국지리정보학회지* 14(3): 236-256.
8. 김정민, 이정빈, 정재훈(2015) 임상도와 Landsat TM 위성영상을 이용한 산림탄소저장량 추정 방법 비교 연구. *한국원격탐사학회지* 31(5): 449-459.
9. 김성훈, 김일권, 전배석, 권혁수(2018a) 산림의 CO₂흡수량 평가를 위한 통계 및 공간자료의 활용성 검토 -안산시를 대상으로-. *환경영향평가학회지* 27(2): 124-138.
10. 김성훈, 박은진, 김일권(2018b) 환경공간정보를 활용한 도시녹지의 탄소흡수량 추정 -안산시를 대상으로-. *한국환경복원기술학회지* 21(3): 13-26.
11. 박석철(2017) 비도시지역의 지속가능한 토지이용관리를 위한 환경생태계획 적용 기법-인천광역시 강화도를 사례로-. 서울시립대학교 대학원 조경학박사학위논문.
12. 박현주, 신휴석, 노영희, 김정민, 박기호(2012) 크리깅 기법을 이용한 단양군의 산림 탄소저장량 추정 -지상부 바이오매스를 대상으로-. *한국지리정보학회지* 15(1): 16-33.
13. 산림청(2021) 2020년 산림기본통계. 산림청.
14. 서연옥, 정성철, 이영진(2017) 국가산림자원조사 자료와 임상도를 활용한 리기다소나무림의 탄소 저장량에 대한 공간분포도 작성: 무주군의 사례로. *한국임학회지* 106(2): 258-266.
15. 신재원, 정수중, 장동영(2023) 고해상도 원격탐사 자료와 기계학습을 이용한 한국 산림의 탄소 저장량 산정. *한국기상학회지* 33(1): 61-72.
16. 용인시(2021) 용인시 도시생태현황지도 작성. 용인시.
17. 이상진, 박홍철, 박관수, 김현숙, 이창민, 김진원, 심규원, 최승운(2022) 한국 국립공원 산림생태계의 수목 탄소 저장량 평가. *한국환경복원기술학회지* 25(3): 1-16.
18. 이정희, 임정호, 김정민, 허준(2015) 다시기 Landsat TM 영상과 기계학습을 이용한 토지피복변화에 따른 산림 탄소저장량 변화 분석. *한국지리정보학회지* 18(4): 81-99.
19. 정재훈, 우엔 룡 효, 허준, 김정민, 임정호(2014) 위성영상을 활용한 지상부 산림바이오매스 탄소량 추정 -k-Nearest Neighbor 및 regression Tree Analysis 방법의 비교 분석-. *대한원격탐사학회지* 30(5): 651-664.
20. 정현용, 이우균, 남기준, 김문일(2013) 기후변화에 따른 임상분포 변화 및 탄소저장량 예측 -용인시 산림을 기반으로-. *한국기후변화학회지* 4(2): 177-188.
21. 조현길, 김승호, 박혜미, 김진영(2019) 남부지방 조경수종의 탄소저감량과 계량모델 -동백나무, 배롱나무 및 가시나무를 대상으로-. *한국조경학회지* 47(3): 31-38.
22. 조현길, 김진영, 박혜미(2013) 도시 상록 조경수의 탄소저장 및 흡수 -소나무와 잣나무를 대상으로-. *한국환경생태학회지* 27(5): 571-578.
23. 조현길, 김진영, 박혜미(2014) 도시 조경수의 탄소저감 효과와 계량모델 개발 -5개 향토수종을 대상으로-. *한*

- 국조경학회지 42(5): 13-21.
24. 조현길, 윤영환, 이기의(1995) 도시녹지의 의한 대기 CO₂의 흡수 -춘천시를 대상으로-. 한국조경학회지 23(3): 80-93.
 25. 조현길, 안태원(2012) 도시 낙엽성 조경수종의 탄소저장 및 흡수. 한국조경학회지 40(5): 160-168.
 26. 탄소중립위원회(2021) 2050 탄소중립 시나리오, 탄소중립위원회.
 27. 한정수(2008) 수도권매립지 수목에 의한 CO₂ 흡수량 산정 및 증대를 위한 식생관리 방안 연구. 서울시립대학교 도시과학대학원 조경학석사 학위논문.
 28. 환경부(2022) 2022 국가 온실가스 인벤토리 보고서. 환경부.
 29. 황진후, 장래익, 전성우(2022) 환경공간정보와 InVEST Carbon 모형을 활용한탄소저장량 추정 방법에 관한 연구: 세종시를 중심으로 - 생태·자연도, 국토환경성평가지도, 도시생태현황지도를 대상으로 -. 한국환경복원기술학회지 25(5): 15-27.
 30. 황진후, 최유영, 유영재, Sun Zhemin, 조효진, 전성우(2021) InVEST Carbon 모형을 활용한 수도권정비계획법상 권역 별 토지이용변화와 탄소저장량 변화 분석. 한국기후변화학회지 12(5-1): 523-535.
 31. IPCC(2006) IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventory. IPCC.
 32. IPCC(2023) CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report. IPCC.
 33. Monk, C. D., G. I. Child and S. A. nicholson(1969) Species diversity of a stratified Oak-Hickory community. Ecology 50(3): 468-470.
 34. 국가통계포털. <https://kosis.kr/>
 35. 산림청. <https://www.forest.go.kr/>

부록 1. 탄소저장량 산출을 위한 용인시 수지구 산림비오톱 유형 분류

연번	용인시 수지구 산림비오톱 유형(우점종)	탄소저장량 산출을 위한 유형 분류
1	갈참나무, 갈참나무-은사시나무, 물오리나무, 백합나무, 버드나무, 신갈나무, 신갈나무-떡갈나무, 은사시나무, 은사시나무-갈참나무, 자작나무, 층층나무-물오리나무	신갈나무 군락
2	리기다소나무	리기다소나무 군락
3	느티나무, 상수리나무, 상수리나무-아까시나무, 아까시나무, 아까시나무-상수리나무	상수리나무 군락
4	졸참나무	졸참나무 군락
5	굴참나무	굴참나무 군락
6	굴참나무-갈참나무, 굴참나무-신갈나무, 신갈나무-굴참나무	굴참나무-신갈나무 군락
7	갈참나무-졸참나무, 신갈나무-졸참나무, 신갈나무-졸참나무-갈참나무, 은사시나무-졸참나무, 졸참나무-갈참나무, 졸참나무-신갈나무	신갈나무-졸참나무 군락
8	일본잎갈나무, 전나무	일본잎갈나무 군락
9	졸참나무-굴참나무, 굴참나무-졸참나무	졸참나무-굴참나무 군락
10	밤나무	밤나무 군락
11	떡갈나무-소나무, 소나무-떡갈나무, 소나무-신갈나무, 신갈나무-소나무	신갈나무-소나무 군락
12	밤나무-갈참나무, 밤나무-신갈나무, 버드나무-밤나무, 신갈나무-밤나무, 신갈나무-밤나무-갈참나무, 자작나무-밤나무	밤나무-신갈나무 군락
13	상수리나무-졸참나무, 졸참나무-상수리나무, 졸참나무-아까시나무	상수리나무-졸참나무 군락
14	밤나무-졸참나무, 졸참나무-밤나무	밤나무-졸참나무 군락
15	갈참나무-아까시나무, 물푸레나무-벙나무, 버드나무-아까시나무, 상수리나무-갈참나무, 상수리나무-신갈나무, 신갈나무-물박달나무, 신갈나무-상수리나무, 신갈나무-오리나무, 아까시나무-갈참나무, 아까시나무-버드나무, 아까시나무-신갈나무, 조경수식재지(느티나무, 단풍나무)	신갈나무-상수리나무 군락
16	무입목지	무입목지
17	리기다소나무-갈참나무, 리기다소나무-신갈나무, 신갈나무-리기다소나무	리기다소나무-신갈나무 군락
18	밤나무-상수리나무, 밤나무-아까시나무, 상수리나무-밤나무, 아까시나무-밤나무	밤나무-상수리나무 군락
19	관목식재지, 산림 법면, 산림 벌채지	관목류 군락
20	굴참나무-상수리나무, 상수리나무-굴참나무	굴참나무-상수리나무 군락
21	소나무, 스트로브젯나무, 조경수식재지(스트로브젯나무)	소나무 군락
22	굴참나무-리기다소나무, 리기다소나무-굴참나무	굴참나무-리기다소나무 군락
23	젯나무	젯나무 군락
24	리기다소나무-졸참나무, 졸참나무-리기다소나무	리기다소나무-졸참나무 군락
25	리기다소나무-상수리나무, 리기다소나무-아까시나무, 상수리나무-리기다소나무, 아까시나무-리기다소나무	리기다소나무-상수리나무 군락
26	신갈나무-일본잎갈나무, 일본잎갈나무-은사시나무	신갈나무-일본잎갈나무 군락
27	굴참나무-밤나무, 밤나무-굴참나무	굴참나무-밤나무 군락
28	굴참나무-소나무, 소나무-굴참나무	굴참나무-소나무 군락
29	리기다소나무-소나무, 소나무-리기다소나무	리기다소나무-소나무 군락
30	소나무-졸참나무, 졸참나무-소나무, 조경수식재지(소나무, 졸참나무)	소나무-졸참나무 군락
31	리기다소나무-일본잎갈나무, 일본잎갈나무-리기다소나무	리기다소나무-일본잎갈나무 군락
32	밤나무-소나무, 소나무-밤나무	밤나무-소나무 군락
33	일본잎갈나무-졸참나무	일본잎갈나무-졸참나무 군락
34	밤나무-젯나무	밤나무-젯나무 군락
35	갈참나무-상수리나무-졸참나무, 졸참나무-갈참나무-물박달나무, 졸참나무-갈참나무-상수리나무, 참나무류(졸참나무, 신갈나무, 상수리나무)	졸참나무-신갈나무-상수리나무 군락
36	밤나무-리기다소나무, 리기다소나무-밤나무	리기다소나무-밤나무 군락
37	밤나무-일본잎갈나무, 일본잎갈나무-밤나무	밤나무-일본잎갈나무 군락
38	상수리나무-소나무, 소나무-상수리나무, 조경수 식재지(스트로브젯나무, 아까시나무)	상수리나무-소나무 군락
39	서어나무	서어나무 군락
40	젯나무-상수리나무	젯나무-상수리나무 군락
41	굴참나무-졸참나무-젯나무	굴참나무-졸참나무-젯나무 군락
42	일본잎갈나무-아까시나무, 일본잎갈나무-상수리나무, 상수리나무-일본잎갈나무	상수리나무-일본잎갈나무 군락
43	참나무류(신갈나무, 젯나무, 졸참나무)	신갈나무-젯나무-졸참나무 군락
44	리기다소나무-소나무-신갈나무	리기다소나무-소나무-신갈나무 군락
45	굴참나무-졸참나무-소나무	굴참나무-졸참나무-소나무 군락
46	신갈나무-젯나무, 밤나무-젯나무	신갈나무-젯나무 군락
47	굴참나무-젯나무	굴참나무-젯나무 군락
48	신갈나무-소나무-물박달나무	신갈나무-소나무-상수리나무 군락
49	소나무-젯나무	소나무-젯나무 군락
50	일본잎갈나무-굴참나무, 굴참나무-일본잎갈나무	굴참나무-일본잎갈나무 군락