

덕유산의 생태계 탄소축적량 산정에 관한 연구

정석희 · 엄지영 · 장지혜 · 이재호¹ · 조구현² · 이재석*

건국대학교 생명과학과, ¹국립생태원, ²산림생산기술연구소

A Study of Accumulated Ecosystem Carbon in Mt. Deogyusan, Korea

Seok-hee Jeong, Ji-young Eom, Ji-hye Jang, Jae-ho Lee¹, Koo-hyun Cho² and Jae-seok Lee*

Biological Science, Konkuk University, ¹National Institute of Ecology

²Forest Practice Research Center, National Institute of Forest Science

Abstract - Understanding of a carbon storage in a regional scale ecosystem is a very important data for predicting change of global carbon cycle. Therefore, the real data collected in the various ecosystems are a very useful for enhancing accuracy of model prediction. We tried to estimate total accumulated ecosystem carbon in Deogyusan National Park (DNP) with naturally well preserved ecosystem. In DNP, vegetations were classified to four main communities with *Quercus mongolica* community (12,636.9 ha, 54.8%), *Quercus variabilis* community (2,987.0 ha, 13.0%), *Pinus densiflora* community (5,758.0 ha, 25.0%), and *Quercus serrata* community (402.9 ha, 1.7%). Biomass and soil carbons were estimated by the biomass allometric equations based on the DBH and carbon contents of litter and soil (0~30 cm) layers collected in 3 plots (30 cm × 30 cm) in each community. The biomass and soil carbons were shown as high value as 1,759,000 tC and 7,776,000 tC, respectively, in *Quercus mongolica* community in DNP area. In *Quercus mongolica*, *Quercus variabilis*, *Quercus serrata*, *Pinus densiflora* communities, the accumulated ecosystem carbon were shown 9,536,000 tC, 1,405,000 tC, 147,000 tC, 346,000 tC, respectively. Also, the total ecosystem carbon was estimated with 11,434,000 tC in DNP.

Key words: accumulated ecosystem carbon, biomass allometric equation, *Quercus mongolica*, Deogyusan National Park

서 론

육상생태계에서 산림생태계는 가장 큰 탄소 저장고로 탄소저장량의 변화 및 변동 연구의 주요한 주제이며 (McCarl and Schneider 2001; IPCC 2014), 전 지구적 탄소순환의 조

절요인으로 작용하므로 산림의 올바른 관리는 지구 온난화 및 기후변화에 긍정적 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 지구 상 면적에서 산림은 41억 ha의 면적을 차지하고 있으며, 육상생태계에서 지상부 탄소축적량의 80%를 저장하고 있다.

산림생태계의 탄소 저장 및 축적은 크게 식생권과 토양권으로 구분되고 (Kim and Kim 1988; Lee 2012), 토양권은 식생권보다 많은 양의 탄소가 축적되어 있는 것으로 보고되고 있다 (Whittaker and Marks 1975; Post and Kwon 2000). 따

* Corresponding author: Jae-seok Lee, Tel. 02-450-3411, Fax. 02-447-3411, E-mail. jaeseok@konkuk.ac.kr

라서 지구적 탄소순환의 이해에는 식생권 만을 연구 대상으로 삼는 것이 아닌 토양권 탄소축적량의 파악도 병행하여야 한다 (Kwon *et al.* 2005; Kwon and Lee 2006). 특히, 토양권에 축적된 탄소는 해당 생태계의 식생군락과 높은 연관성을 보이기 때문에 토양과 대기 간 탄소순환에 있어 생태계의 식생변화는 중요한 요인으로 작용한다 (Lee 2004).

우리나라의 산림면적은 총 637만 ha로 국토 총면적의 64%를 차지하며 14억 5천 톤의 탄소를 축적하고 있는 것으로 보고되고 있다 (Weon 2012). 국내 산림면적의 6.6%는 국립공원으로 지정되어 있으며, 국립공원은 일반 국유림과 사유림과는 달리 산림의 군락, 구조, 기능 등의 생태학적 요소들을 자연 그대로 유지 및 관리 (Lee *et al.* 1994; Kim 2012) 하고 있어 생태계 다양성이 뛰어난 생태계이다. 이러한 국립공원의 특성은 해당 지역의 생태계를 대표할 수 있어 국립공원 내 산림의 토양 및 바이오매스 (biomass) 탄소축적량의 연구는 그 의미가 크다고 할 수 있다. 현재 국내 국립공원에 관한 연구는 산림생태계를 구성하는 요소인 산림의 주요 식생분포 연구 (Kim *et al.* 2010; Kim *et al.* 2011; Gwon *et al.* 2013; Kim *et al.* 2013), 산림 식생의 군락 구조 분석 (Kim 1971; Kim *et al.* 2011), 식생의 천이 등에 관한 연구가 주를 이루며 산림의 biomass 탄소축적량 분석 관련 연구 (Lee 2011, 2012)는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 식물구계 상 남부아구에 속하며, 지리적으로는 백두대간의 중, 남부지역의 중심부에 해당하는 지역으로 생태학적인 측면에서 매우 중요한 위치를 점하고 있는 (Kim *et al.* 2013) 덕유산국립공원을 대상으로 국립공원 내 주요 생태계의 biomass 탄소축적량 및 토양권 탄소축적량의 파악 및 식생군락의 상호관계를 해석하여 교란되지 않는 산림 생태계에 대한 탄소축적량 특성의 이해를 높이는 데 본 연구의 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

덕유산국립공원은 지리적으로 N 35°45'~36°00', E 127°39'~127°50'에 위치하고, 행정구역상으로는 전북 무주와 장수, 경남 거창과 함양군 등 2개 도 4개 군에 주로 위치하고 있다 (<http://deogyu.knps.or.kr/front/portal/visit/>).

식물구계로는 한반도 남부아구에 속하며, 생물기후구계도 중 남부내륙형에 속한다 (Yim and Kira 1975). 기후는 한반도 남부의 난온대성기후와 북부의 대륙성기후의 중간적 특색을 갖는다. 지난 30년간 (1971~2000년)의 주요 기상 자료를 종합하면 연평균기온은 11.5°C이며, 강수량은 1,265.9

mm로 나타났다 (Korea National Park Service 2004).

2. 식생분포 면적

덕유산국립공원의 현존식생분포는 1:25,000 도엽의 지형도에 환경부의 생태자연도 (<http://egis.me.go.kr/egis/home/main.asp>)와 산림청의 임상도 (<http://fgis.forest.go.kr/fgis/>)를 중첩하여 AutoCAD상에서 작성하였다. 작성된 현존식생도를 바탕으로 해당 지역에서 점유 면적이 높은 순으로 우선순위를 정하였다. 정해진 군락에 대하여는 현지 조사를 바탕으로 조사 가능 여부 (접근성)와 수목 밀도, 수고, 종조성, 생육지의 입지조건 등과 같은 생태학적 측면에서 해당 군락이 덕유산 지역에서 대표성을 나타낼 수 있는지를 판단하여 정밀 조사구로 설정하였다.

현존식생도에 우점하는 수종에 따라 하나의 군락으로 분류하였고, 그에 따른 면적을 산출하였다. 주요 군락별로 산정된 탄소축적량에 각각의 면적을 곱해 덕유산국립공원 전체 면적에 대한 탄소축적량으로 환산하였다.

3. Biomass 탄소축적량

Biomass를 산정하기 위해 매목조사를 실시하였으며, 매목 조사는 조사구로 선정된 군락의 내부에 교목층을 구성하고 있는 수목의 수고에 해당하는 개략적인 높이를 조사한 후, 방형구의 한 변 길이로 정하여 교목의 수고에 따라 다양한 조사 방형구 (100 m²~400 m²)를 설치하였다. 조사구 내부에 위치하는 직경 5 cm 이상 되는 수목에 대하여 DBH (Diameter at breast height)를 측정하고 식물종명을 기록하였다.

수종별 흉고직경 (DBH)에 의한 biomass 상대생장식 $Y = aD^b$ 및 흉고직경과 수고에 의한 biomass 상대생장식 $Y = a(D^2H)^b$ 이 있지만, 산림과학원 (2010)에 의하면 흉고직경 (D)과 수고 (D²H)의 biomass를 비교한 결과, 흉고직경만을 독립변수로 하는 biomass 상대생장식과 차이가 별로 없는 것으로 나타났다 (Korean Forest Research Institute 2010). 따라서 본 연구에서는 조사한 방형구 내의 임목의 흉고직경을 상대생장식에 적용하여 단위면적당 biomass를 산정하였으며, 수고는 부수적인 자료로 활용하였다.

4. 리터층 탄소축적량

각 임목 biomass 조사를 위한 방형구 내에 소 방형구 (30 cm × 30 cm)를 각 3개씩 소격자를 설치하고, 격자 내의 리터층을 수거하였다. 수거한 리터는 밀봉한 후 실험실로 옮겨 80°C의 건조기에서 48시간 이상 건조시킨 후, 건중량을 측정하여 토양밀도를 구하였다. 리터층의 탄소량은 건중량에 유기물 탄소계수 0.5를 곱하여 구하였다 (Wang *et al.* 2002).

5. 토양층 탄소축적량

조사지 생태계 내의 토양층에 축적되어 있는 탄소량을 파악하기 위하여, 임상의 토양을 채취하여 토양의 토양밀도, 유기물함량, 토양비율을 조사하여 토양 탄소축적량을 추정하였다. 토양은 리터를 채취한 지점의 지표면으로부터 30 cm 깊이까지 각 5 cm 깊이 단위로 토양샘플관 ($\phi=5$ cm, $h=5.1$ cm)을 이용하여 채취하였다.

유기물함량 (organic matter contents)은 작열감량법 (LOI; Loss on ignition method) (Heiri *et al.* 2001)을 이용하여 산정하였다. 야외 조사구에서 채취한 토양을 실험실로 옮긴 후, 80°C 건조기에서 48시간 건조시킨 무게를 칭량하여 토양밀도 (soil bulk density)를 구하였다. 건조시킨 토양은 2 mm 체로 쳐 2 mm 이하의 토양만을 일정량 넣은 도가니를 550°C의 전기로에서 4시간 동안 작열시킨 후, 작열 전과 작열 후의 토양 무게 차이를 작열 전 토양 무게로 나눈 값을 백분율로 나타내어 얻었다. 2 mm 이상 되는 것은 물로 재차 깨끗하게 토양을 씻어 순수하게 자갈만 추출하여 건조기에 건조 후 무게를 측정, 석력 함량을 산정한 후 그를 바탕으로 토양비를 산정하였다.

이러한 과정으로 수집된 자료를 바탕으로 하여 Wang *et al.* (2002)의 방법으로 토양 내 탄소량 (Sc)을 구하였다(식 1).

$$Sc = r \cdot H \cdot b \cdot a \cdot k \quad (1)$$

(r: 토양밀도, H: 분석한 토양두께 b: 유기물 함량, a: 토양의 탄소계수, k: 토양비)

결 과

1. 덕유산의 식생 및 분포특성

Fig. 1과 Table 1은 덕유산국립공원에 성립되어 있는 주요 식생의 분포 현황과 점유 면적을 나타내고 있다. Fig. 1에서 인근의 지역의 식생 현황과 같이 신갈나무군락은 해발 700 m 정도 이상으로 비교적 해발 고도가 높은 지역에 위치하고 있으며, 해발 700 m 정도의 지점에서는 소나무나 졸참나무와 같은 수종과 혼생하여 자라지만 고도가 증가하면서 신갈나무의 비율이 증가하여 1,400~1,500 m 정도에서는 순림 형태로 나타난다. 약 1,500 m 이상 되는 지역에서는 지역마다 다르지만 구상나무와 같은 침엽수림이 나타나면서 밀도가 약간 낮아지는 경향을 보이지만 고도가 높은 산정 지역에서도 여전히 신갈나무는 높은 우점도로 분포되어 있다. Kim *et al.* (2014)은 오대산의 경우 고도 1,000~1,200 m가 신갈나무군락의 최적지로 보고한 것과 비교하면 다소 높은

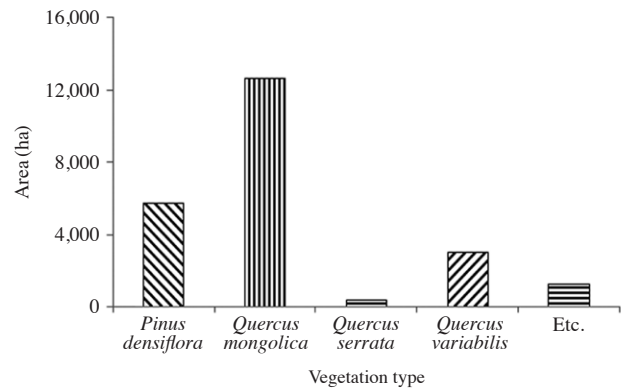


Fig. 1. Area of four major ecosystems established in Deogyusan National Park.

고도에 신갈나무가 형성되어 있는데, 이것은 덕유산이 오대산보다 비교적 남쪽에 위치하고 있기 때문에 판단된다. 한편 고도가 약 700 m 이하로 낮아지게 되면 밀도가 높은 순림 형태의 신갈나무림은 고도가 낮아질수록 졸참나무, 서어나무, 굴참나무 등과 혼생하는 비율이 높아져 밀도가 낮아지는 형태로 나타났는데, Jang *et al.* (2014)이 보고한 계룡산 식생 분포에서 상부지역에는 신갈나무림, 하부지역에 졸참나무, 서어나무, 굴참나무가 나타나는 경향과 유사한 결과이다. 한편 덕유산에서 신갈나무의 구성비가 높은 신갈나무 순림의 면적은 108,814,674 m²로 전체 비율의 47.2%를 차지하여 덕유산에서 가장 넓은 면적을 점유하고 있는 것으로 파악되었다. 이러한 비율에 신갈나무림으로 분류되는 신갈나무-졸참나무군락과 신갈나무-굴참나무군락을 신갈나무군락에 포함시키게 되면 점유면적 117,263,945 m²로 덕유산국립공원의 50.8%가 신갈나무림 식생으로 구성되어 있는 결과로 나타난다 (Table 1).

신갈나무 다음으로 분포역이 넓은 순림군락은 23,146,444 m²로 10.0%의 점유율을 가진 굴참나무군락으로 평가되었다. 굴참나무군락은 비교적 큰 돌이 노출되어 있는 전석지와 같이 토양 형성이 지연되는 지역에 성립되어 있었으며, 이러한 지형에 굴참나무군락이 형성되는 것은 일반적인 현상으로 보인다 (Jang *et al.* 2014). 한편 저지의 소나무군락과 고지의 신갈나무군락 분포지의 중간 지역의 해발고도에 넓게 자리 잡고 있다. 이에 더하여 굴참나무가 우점하는 굴참나무-소나무군락 (1,036,142 m²; 0.5%), 굴참나무-신갈나무군락 (1,626,341 m²; 0.7%), 굴참나무-졸참나무군락 (4,060,680 m²; 1.8%)을 합하게 되면 총 29,869,607 m²로 약 13.0%의 점유율을 보였다. 세 번째로 넓게 형성되어 있는 군락은 소나무군락으로 소나무의 우점도가 가장 높은 소나무군락의 면적은 19,525,685 m² (8.5%)로 순림형태로는 굴참나무림보

Table 1. Area of each ecosystem established in Deogyusan National Park

Ecosystem type	Area (m ²)	Ratio (%)
Water surface	295,231	0.13
Denuded area & facilities	1,846,609	0.80
Farmland	10,098,950	4.38
<i>Miscanthus sinensis</i>	321,980	0.14
<i>Larix kaempferi</i> plantation	139,898	0.06
<i>Pinus rigida</i> plantation	5,402,037	2.34
<i>Abies koreana</i>	50,270	0.02
<i>Abies koreana-Quercus mongolica</i>	177,651	0.08
<i>Abies koreana-Taxus cuspidata</i>	214,223	0.09
<i>Carpinus laxiflora</i>	1,175,638	0.51
<i>Fraxinus mandshurica</i>	7,929,591	3.44
<i>Pinus densiflora</i>	19,525,685	8.46
<i>Pinus densiflora-Quercus monolica</i>	13,670,463	5.93
<i>Pinus densiflora-Quercus serrata</i>	3,159,741	1.37
<i>Pinus densiflora-Quercus variabilis</i>	15,240,034	6.61
<i>Quercus mongolica</i>	108,814,674	47.16
<i>Quercus mongolica-Quercus serrata</i>	4,141,833	1.80
<i>Quercus mongolica-Quercus variabilis</i>	4,307,438	1.87
<i>Quercus serrata</i>	2,640,129	1.14
<i>Quercus serrata-Pinus densiflora</i>	451,700	0.20
<i>Quercus serrata-Quercus mongolica</i>	401,159	0.17
<i>Quercus serrata-Quercus variabilis</i>	536,396	0.23
<i>Quercus variabilis</i>	23,146,444	10.03
<i>Quercus variabilis-Pinus densiflora</i>	1,036,142	0.45
<i>Quercus variabilis-Quercus mongolica</i>	1,626,341	0.70
<i>Quercus variabilis-Quercus serrata</i>	4,060,680	1.76
<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	312,615	0.14
Total	230,723,552	100

다 낮은 면적을 가지지만 소나무림을 포함하여 소나무의 우점도가 높은 소나무-신갈나무군락 (13,670,463 m²; 6.0%), 소나무-졸참나무군락 (3,159,741 m²; 1.4%), 소나무-굴참나무군락 (15,240,034 m²; 6.6%)으로 5,595,920 m²로 22.4%를 점유하고 있어 실제적으로 소나무가 우점하는 군락이 굴참나무가 우점하는 군락보다 약 2배 정도 넓은 면적을 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 가장 해발고도가 높은 지역에 신갈나무군락이 형성되어 있고 바로 아래 졸참나무군락, 그 바로 아래의 해발고도가 낮은 지역에 졸참나무군락과 굴참나무군락, 아래고도에 소나무군락이 수직적인 구배를 가지고 분포하는 형태를 가진다. 이외에 산정 능선부에 나타나는 철쭉군락 (312,615 m², 0.14%), 리기다소나무식재림 (5,402,037 m², 2.34%), 일본잎갈나무식재림 (139,898 m², 0.06%)을 차지하며 산정부에 나타나는 구상나무우점군락 (442,144 m², 0.19%)으로 나타났다. 위와 같은 식생상황에 수역, 나지 및 시설지, 경작지, 역새군락이 12,562,770 m² (5.45%)를 차지하고 있는 것으로 조사되었으나 이러한 군락은 탄소저장량 산정에서 제외시켰다. 이러한 자료를 바탕으로 탄소저장량을 산출하기 위해 주요 유형별로 구분하였다. 그 결과 신갈나무군락은

12,636.9 ha로 54.8%, 굴참나무군락은 2,987.0 ha로 13.0%, 소나무군락은 5,758.0 ha로 25.0%, 졸참나무군락은 402.9 ha로 1.7%, 기타 (농경지, 역새밭, 수역) 1,287.5 ha로 5.6%의 면적을 차지하는 것으로 조사되었다 (Table 1).

2. Biomass 탄소축적량

덕유산 지역에 정밀 조사구를 설치하여 추출된 biomass 탄소축적량은 신갈나무 우점군락에서는 주간 (trunk)에서 76.7 tC ha⁻¹, 가지 (stem)에서 42.2 tC ha⁻¹, 잎 (leaf)이 4.3 tC ha⁻¹, 뿌리 (root)가 38.5 tC ha⁻¹로 총 161.7 tC ha⁻¹의 탄소를 가지고 있는 것으로 조사되었다 (Fig. 2a). 한편 굴참나무 우점군락에서는 주간에서 106.9 tC ha⁻¹, 가지에서 41.5 tC ha⁻¹, 잎이 4.1 tC ha⁻¹, 뿌리가 46.1 tC ha⁻¹로 총 198.6 tC ha⁻¹의 탄소를 가지고 있는 것으로 조사되었다 (Fig. 2b). 소나무 우점군락에서는 주간에서 54.7 tC ha⁻¹, 가지에서 10.6 tC ha⁻¹, 잎이 2.5 tC ha⁻¹, 뿌리가 18.3 tC ha⁻¹로 총 86.1 tC ha⁻¹의 탄소를 가지고 있는 것으로 조사되었다 (Fig. 2c). 졸참나무 우점군락에서는 주간에서 95.1 tC ha⁻¹, 가지에서 56.0 tC ha⁻¹, 잎이 4.6 tC ha⁻¹, 뿌리가 33.0 tC ha⁻¹로 총 188.7 tC ha⁻¹의 탄소를 가지고 있는 것으로 조사되었다 (Fig. 2d). Jang *et al.* (2014)은 계룡산에서 신갈나무군락의 biomass 탄소를 주간에 36.5 tC ha⁻¹, 가지에 21.2 tC ha⁻¹, 잎에 2.1 tC ha⁻¹, 뿌리에 16.5 tC ha⁻¹로 보고하였는데, 이와 비교한다면 덕유산의 신갈나무군락은 계룡산의 신갈나무군락보다 2배 정도 많은 양이 축적되어 있는 것이 된다. 하지만 소나무군락은 계룡산의 경우 주간에 65.9 tC ha⁻¹, 가지 16.4 tC ha⁻¹, 뿌리 25.5 tC ha⁻¹, 잎 3.3 tC ha⁻¹로 덕유산의 소나무군락이 비교적 낮은 값을 보였다. 이러한 상반된 결과는 두 지역의 식생이 최고 고도, 지형, 지질 (덕유산보다 노출 암반이 상대적으로 많은 계룡산) 등과 같은 요인의 차이에서 발생하는 것으로 판단된다.

이러한 결과에서 주간에 가장 높은 탄소가 축적되어 있는 군락은 굴참나무 우점군락으로 106.9 tC ha⁻¹이 축적되어 있었고, 졸참나무 우점군락이 95.1 tC ha⁻¹, 신갈나무 우점군락이 76.7 tC ha⁻¹을 보였으며, 소나무 우점군락이 54.7 tC ha⁻¹로 가장 낮은 탄소축적량을 보였다. 소나무 우점군락의 이러한 낮은 탄소축적량은 덕유산 지역에서 소나무 우점군락이 이미 상당한 천이단계가 진행되어 외관상으로는 소나무군락으로 평가되나 실제로는 노령목 몇 개체가 군락의 상부를 덮고 있고 하부에 DBH가 작은 낙엽활엽수가 후계목으로 자리 잡고 있어 탄소축적량으로는 높게 계산되지 않는 것이 원인인 것으로 판단된다. 정밀 매목조사에서 소나무 우점군락은 DBH가 비교적 큰 개체들로 구성된 군락 형태가 일반적이었다. 한편 작은 가지의 탄소량에서 졸참나무 우점군락

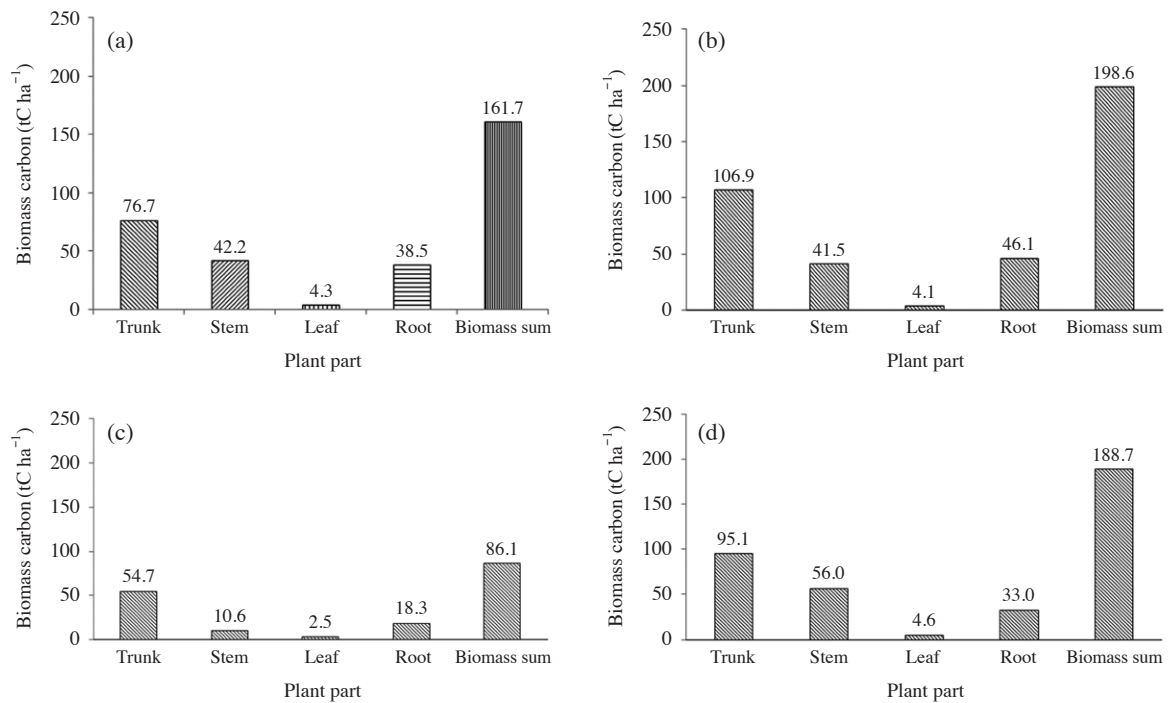


Fig. 2. Composition of biomass carbon of four major ecosystems in Deogyusan National Park, Korea (a, *Quercus mongolica*; b, *Quercus variabilis*; c, *Pinus densiflora*; d, *Quercus serrata*).

은 56.0 tC ha^{-1} 로 가장 높은 탄소축적량을 보였으며 원줄기와는 다르게 굴참나무 우점군락이 41.5 tC ha^{-1} 로 나타났다. 이외에 신갈나무 우점군락과 소나무 우점군락은 각각 42.2 tC ha^{-1} 과 10.6 tC ha^{-1} 로 나타났다.

잎의 탄소축적량은 신갈나무 우점군락을 제외한 모든 군락에서 5 tC ha^{-1} 이하의 낮은 탄소축적량을 보였으며, 뿌리의 탄소축적량은 굴참나무 우점군락이 46.1 tC ha^{-1} 로 가장 높았고 신갈나무 우점군락이 38.5 tC ha^{-1} , 졸참나무 우점군락이 33.0 tC ha^{-1} , 소나무 우점군락이 18.3 tC ha^{-1} 로 나타났다. 이들 부위를 종합적으로 비교할 때, 각각의 군락에 축적된 바이오메스 탄소량은 굴참나무 우점군락에서 198.6 tC ha^{-1} 로 가장 높았고, 두 번째로 졸참나무 우점군락에서 188.7 tC ha^{-1} , 그 다음으로 161.7 tC ha^{-1} 을 차지하고 있는 신갈나무 우점군락, 다음으로 가장 낮은 축적량으로 조사된 소나무 우점군락이 86.1 tC ha^{-1} 로 조사되었다 (Fig. 3).

3. Litter층 탄소축적량

토양권의 탄소축적량은 일반적으로 리터층에서 가장 낮은 탄소저장량을 보였다 (Fig. 4). 이는 조사 시기가 주로 리터 분해가 진행된 7~8월 이후에 진행된 것이 원인으로 보인다. 이러한 낮은 리터량은 추계에 많은 양의 리터가 공급되어 다시 저장량이 높아지므로 시기적인 차이를 가져오게 되지만

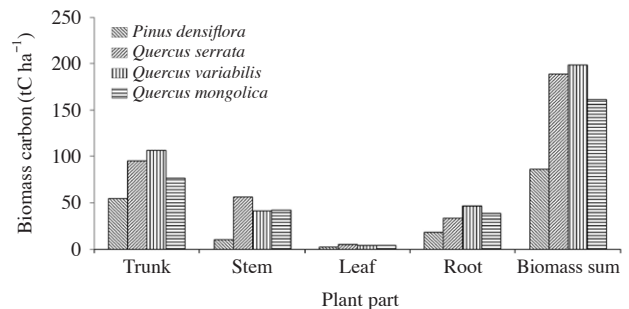


Fig. 3. Distribution of biomass carbon of each ecosystem in Deogyusan National Park, Korea.

낙엽이 발생한 이후에 조사를 시행할 경우, biomass 탄소축적량에서 잎량을 제외시켜야 하므로 전체적인 토양탄소저장량 측면에서는 큰 차이를 가져 오지 않게 된다. 낙엽의 분해는 수종 및 낙엽의 질에 따라 분해율이 달라지며, 이 중 C/N 비가 분해속도에 가장 큰 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다 (Lee *et al.* 2006; Weon *et al.* 2012). 하지만 전체적으로 낮은 양의 리터에서도 신갈나무군락에는 가장 많은 리터탄소가 축적되어 있었는데, 이는 신갈나무군락이 비교적 높은 고도에 분포하기 때문에 고 해발지역의 낮은 온도가 리터분해 속도를 낮췄기 때문으로 판단된다.

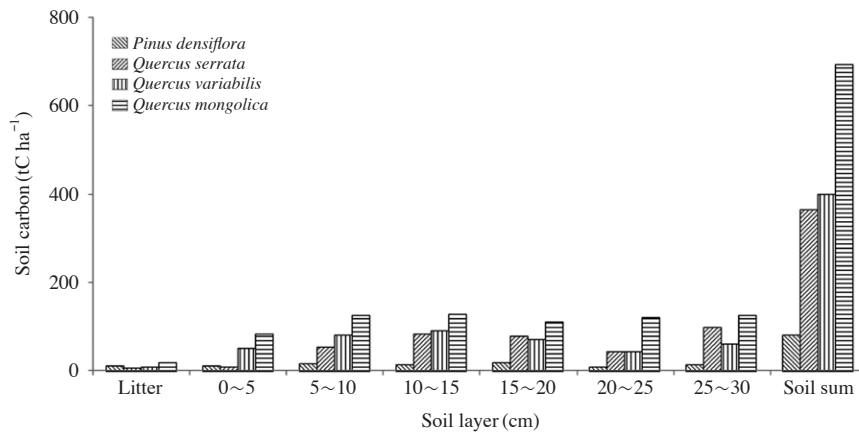


Fig. 4. Soil carbon accumulated in major four ecosystems in Deogyusan National Park.

4. 토양층 탄소축적량

토양층 탄소축적량에서 신갈나무 우점군락은 전체 토양 깊이에서 다른 군락에 비해 가장 높은 탄소저장량을 보였다. 리터층에서 19.4 tC ha^{-1} , 0~5 cm와 5~10 cm에서 각각 82.8 tC ha^{-1} 과 125.9 tC ha^{-1} 로 증가하였고, 10~15 cm에서는 128.6 tC ha^{-1} 로 가장 많은 탄소가 축적되어 있는 층으로 조사되었다. 15~20 cm, 20~25 cm, 25~30 cm에서도 각각 111.5 tC ha^{-1} , 120.3 tC ha^{-1} , 125.3 tC ha^{-1} 로 조사되어 토양 표면 보다는 중간층에서 높은 토양탄소축적량을 보였다. 이러한 결과는 지리산지역의 식생권 탄소축적량 조사에서 신갈나무림의 토양이 가장 높은 탄소를 축적하고 있다고 보고한 Lee (2012)의 결과와 유사한 경향이다. 신갈나무 우점군락의 높은 탄소저장량은 신갈나무 우점군락이 덕유산 이외의 지역과 마찬가지로 다른 군락에 비해 비교적 높은 고도에 성립되어 있는 이유로 저고도의 군락에 비해 비교적 낮은 온도 조건에 처해 있어 낮은 온도로 인해 미생물 활동에 의한 분해가 늦게 진행되었기 때문으로 판단된다 (Lee *et al.* 2006; Weon *et al.* 2012). 이러한 신갈나무 우점군락의 각 층별 높은 토양탄소축적량이 반영되어 0~30 cm까지의 토양층에 축적된 탄소량은 694.4 tC ha^{-1} 로 굴참나무 우점군락의 400.4 tC ha^{-1} , 졸참나무 우점군락의 364.9 tC ha^{-1} , 소나무 우점군락의 80.1 tC ha^{-1} 에 비해 약 8.6 배 정도 높은 탄소저장량의 결과를 보였다 (Fig. 4).

한편 굴참나무 우점군락의 탄소축적량은 리터층에서는 8.0 tC ha^{-1} , 0~5 cm에서는 50.5 tC ha^{-1} , 5~10 cm에서는 81.6 tC ha^{-1} , 10~15 cm에서 91.3 tC ha^{-1} 로 가장 높게 나타나고 15~20 cm에서 71.5 tC ha^{-1} , 20~25 cm에서 44.8 tC ha^{-1} , 25~30 cm에서 60.6 tC ha^{-1} 로 줄어드는 추세를 보였고 30 cm까지의 총 탄소축적량은 총 408.4 tC ha^{-1} 로 조사되었다

(Fig. 4).

졸참나무 우점군락에서 리터층에는 6.1 tC ha^{-1} , 0~5 cm에서는 8.5 tC ha^{-1} , 5~10 cm에서는 52.8 tC ha^{-1} , 10~15 cm에서 84.1 tC ha^{-1} , 15~20 cm에서 77.7 tC ha^{-1} , 20~25 cm에서 43.1 tC ha^{-1} , 25~30 cm에서 98.8 tC ha^{-1} 로 총 371.1 tC ha^{-1} 의 탄소가 축적되어 있는 것으로 파악되었다.

침엽수인 소나무 우점군락에서 리터층에는 10.2 tC ha^{-1} , 0~5 cm에서는 11.2 tC ha^{-1} , 5~10 cm에서는 15.8 tC ha^{-1} , 10~15 cm에서 14.4 tC ha^{-1} , 15~20 cm에서 17.8 tC ha^{-1} , 20~25 cm에서 8.5 tC ha^{-1} , 25~30 cm에서 12.5 tC ha^{-1} 로 총 91.3 tC ha^{-1} 의 탄소가 축적되어 덕유산의 주요 군락 중 가장 낮은 탄소축적량을 보이고 있는 것으로 파악되었다.

5. 덕유산국립공원 지역 및 군락별 탄소축적량

덕유산의 biomass 탄소저장량은 신갈나무 우점군락이 가장 많은 탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났고, 다음으로 굴참나무 우점군락, 소나무 우점군락, 졸참나무 우점군락 순으로 조사되었다. Biomass 탄소저장량은 각각 신갈나무 우점군락이 1,759,000 tC, 굴참나무 우점군락이 459,000 tC, 소나무 우점군락이 168,000 tC, 졸참나무 우점군락이 49,000 tC로 총 2,435,000 tC로 산정되었다 (Fig. 5a).

토양 탄소저장량은 biomass 탄소저장량과 마찬가지로 신갈나무 우점군락이 가장 많은 탄소를 저장하고 있었고, 다음으로 굴참나무 우점군락, 소나무 우점군락, 졸참나무 우점군락 순으로 조사되었다. 토양 탄소저장량은 각각 신갈나무 우점군락에서 7,776,000 tC, 굴참나무 우점군락에서 945,000 tC, 소나무 우점군락에서 178,000 tC, 졸참나무 우점군락에서 97,000 tC로 산정되었다 (Fig. 5b). 여러 연구보고에서 식생의 탄소축적량은 고도가 증가할수록 감소하는 온도에 의

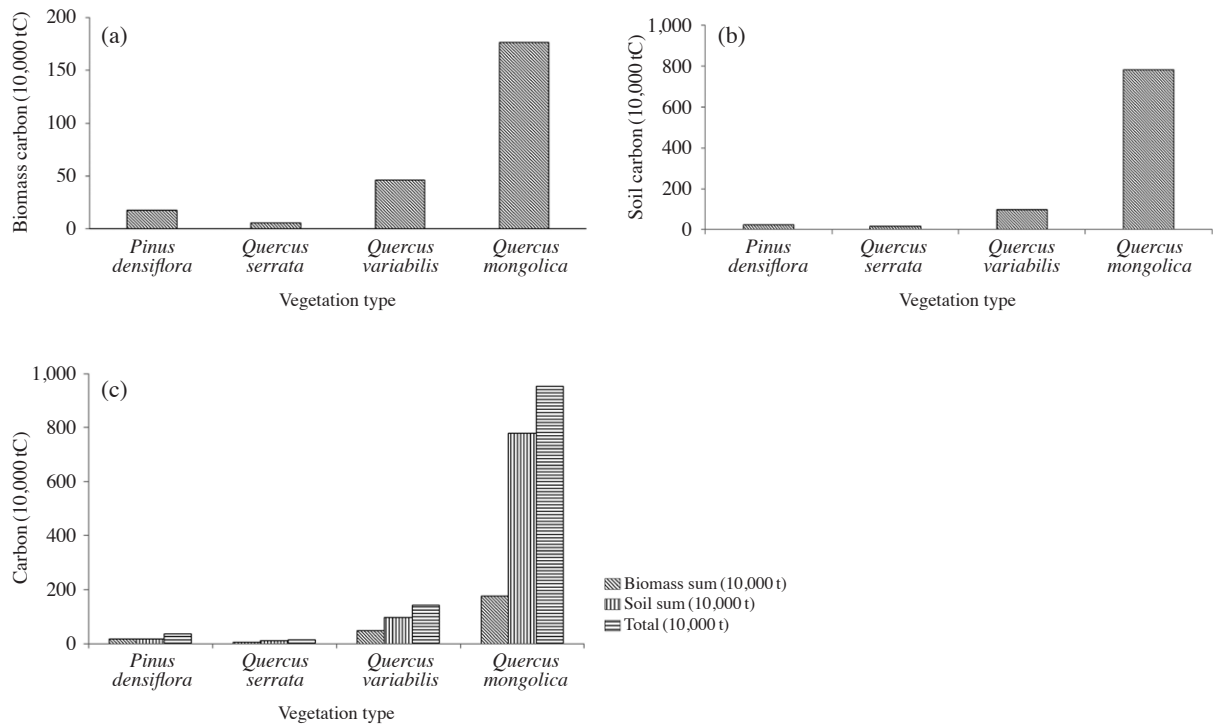


Fig. 5. Biomass and soil carbons accumulated in four major ecosystems in Deogyusan National Park (a, biomass; b, soil; c, biomass + soil).

해 biomass 탄소량은 감소하는 경향을 보이거나 반대로 토양 탄소량축적량은 증가한다는 결과 (Zhu *et al.* 2010)를 보고하였는데, 본 결과에서의 고도에 따른 탄소축적량의 분포 형태도 이와 유사한 결과라 판단된다. 식생분포는 기후, 지형, 토양 등의 요인에서 기인하는 거시적 및 미시적 환경변화에 따라 다르게 나타나기 때문이며 산림생태계에서 탄소축적량은 기후, 산림형태, 임령, 토양조건에 강한 영향을 받는다 (Pregitzer and Euskirchen 2004).

이를 바탕으로 덕유산국립공원 지역에 성립되어 있는 식생의 탄소저장량은 신갈나무 우점군락에 9,536,000 tC, 굴참나무 우점군락에서 1,405,000 tC, 졸참나무 우점군락에서 147,000 tC, 소나무 우점군락에서 346,000 tC로 산정되었다 (Fig. 5c).

적 요

지역적 규모의 탄소순환과 저장량 변화에 대한 자료는 지구적 규모의 탄소순환 형태 변화를 예측하는 중요한 자료가 된다. 따라서 다양한 지역적 규모의 생태계에 대한 자료 수집은 필수적이다. 본 연구는 국내 다양한 생태계 중 자연성이 높은 국립공원지역 산림 생태계의 탄소축적량을 산정하

여 자연군락이 측정 가능한 탄소축적 잠재량을 평가하기 위해 진행되었다. 연구대상지인 덕유산국립공원은 신갈나무 우점군락 10,881.5 ha (47.2%), 굴참나무 우점군락 2,314.6 ha (10.0%), 소나무 우점군락 1,952.6 ha (8.5%), 졸참나무 우점군락 402.9 ha (1.7%) 등이 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 조사는 군락의 분포지역을 확인하고, 수목밀도와 종 조성 등을 고려하여 선정하였고, biomass 탄소축적량을 산정하기 매목조사를 실시하였다. 각 매목조사구 내 토양샘플 구 (30 cm × 30 cm)를 각 3개씩 설치하여 토양 탄소축적량을 조사하였다. Biomass 탄소축적량과 토양 탄소축적량은 신갈나무 우점군락에서 각각 1,749,000 tC와 7,776,000 tC로 가장 높은 값이 측정되었다. 군락별 전체 생태계에 축적되어 있는 탄소량은 신갈나무 우점군락과, 굴참나무 우점군락, 졸참나무 우점군락, 소나무 우점군락에서 각각 9,536,000 tC, 1,405,000 tC, 147,000 tC, 346,000 tC로 나타났다. 또한 덕유산국립공원의 전체 생태계 탄소축적량은 11,434,000 tC로 산정되었다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ010013

2015)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- Gwon JH, MK Sin, HJ Kwon and HK Song. 2013. A Study on the Forest Vegetation of Jirisan National Park. *J. Korean Environ. Res. Tech.* 16:93-118.
- Heiri O, AF Lotter and G Lemcke. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* 25:101-110.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva.
- Jang JH, JS Lee, JS Jeong, TY Song, KJ Lee, SU Suh and JS Lee. 2014. A study of environment of forest ecosystem carbon storage in Gyeryongsan National Park, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 47:319-327.
- Kim CH, JG Oh and NS Lee. 2013. A Study on the forest vegetation of Deogyusan National Park. *Korean J. Environ. Ecol.* 46:33-40.
- Kim CH, JG Oh, YE Choi, SS Lee and EO Kang. 2013. Study on the Distribution of Plant Community in the Deogyusan National Park. *Korean J. Environ. Ecol.* 46:570-580.
- Kim CH, JG Oh, EO Kang and JG Lim. 2014. Community Distribution on Mountain forest vegetation of the Gyeongbongsan area in the Odaesan National Park, Korea. *Korean J. Ecol. Environ.* 47:135-145.
- Kim G and C Kim. 1988. Research trends on forest biomass production in Korea. *J. Korean. Forest Environ.* 8:94-107.
- Kim HS, SM Lee and HG Song. 2011. Actual vegetation distribution status and ecological succession in the Deogyusan National Park. *Korean J. Environ. Ecol.* 25:37-43.
- Kim HS, S.M Lee and HK Song. 2010. Vegetation structure of the Hyangjeokbong in the Deogyusan National Park. *J. Korean Environ. Res. Tech.* 24:708-722.
- Kim JH. 1971. A study of forest productivity and growth structure, *Pinus rigida* plantation. *J. Plant Biol.* 14:19-23.
- Kim YO. 2012. Study on national park visitors' consciousness on nature conservation and their attitude toward eco-tourism (-Focusing on BukHanSan National Park). *Tourism Res.* 26:77-97.
- Korean Forest Research Institute. 2010. Survey manual for biomass and soil carbon.
- Korea Forest Service. 2010. Forest geographic information system. Korea Forest Service. Daejeon. Available from <http://fgis.forest.go.kr/fgis>. Accessed 2015 December 16.
- Korea National Park Service. 2004. Deogyusan National Park Nature Resources Survey.
- Korea National Park Service. 2009. Deogyusan national park. Korea National Park Service. Seoul. Available from <http://deogyu.knps.or.kr/front/portal/visit>. Accessed 2015 December 16.
- Kwon GC and DG Lee. 2006. Above- and below-ground biomass and energy content of *Quercus mongolica*. *J. Korean. Forest Environ.* 25:31-38.
- Kwon S, JH Seo, YM son and YK Park. 2005. Biomass carbon emissions according to conversion of forest land in Korea. *J. Korean. Forest Environ.* 24:10-15.
- Lee IK, KJ Kim, JM Cho, DW Lee, DS Cho and JS Yoo. 1994. Biodiversity Korea to 2000. Minumsa, Seoul.
- Lee IK, JH Lim, CS Kim and YK Kim. 2006. Nutrient dynamics in decomposing leaf litter and litter production at the Long-Term Ecological Research Site in Mt. Gyeongbongsan. *J. Ecol. Field Biol.* 26: 585-591.
- Lee JS. 2004. A study on change of an accumulated organic matter contents according to successional stage on temperate grassland. *Korean J. Environ. Biol.* 22:381-386.
- Lee NY. 2011. Estimation of Carbon Storage in Three Cool-Temperate Broad-Leaved Deciduous Forests at Bukhansan National Park, Korea. *J. National Park Res.* 2:53-57.
- Lee NY. 2012. Estimation of carbon storage in three cool-temperate broad-leaved deciduous forests at Jirisan National Park, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 30:121-127.
- McCarl BA and UA Schneider. 2001. Greenhouse gas mitigation in U.S agricultural forest. *Sci.* 294:2481-2482.
- Ministry of Environment. 2015. Environmental geographic information system. Ministry of Environment. Sejong. Available from <http://egis.me.go.kr/egis/home/main.asp>. Accessed 2015 December 16.
- Post WM and KC Kwon. 2000. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biol.* 6:317-328.
- Pregitzer KS and ES Euskirchen. 2004. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biol.* 10:2052-2077.
- Wang GJ, G Qian, G Cheng and Y Lai. 2002. Soil organic carbon pool of grassland on the Qinghai-Tibetan plateau and its global implication. *Sci. Total Environ.* 291:207-217.
- Weon HG. 2012. Forest management for increasing carbon absorption. *For. magazine (National forestry cooperative federation)* 2:58-62.
- Weon HY, GH Oh, JH Pyo and HT Mun. 2012. Decay rate and nutrient dynamics during litter decomposition of *Quercus acutissima* and *Quercus myrsinaefolia*. *Korean J. Environ.*

- Ecol. 26: 74-81.
- Whittaker RH and PL Marks. 1975. Methods of assessing terrestrial productivity. Springer-Verlag, New York.
- Yim YJ and T Kira. 1975. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula. Distribution of some indices of thermal climate. Jap. J. Ecol. 25:77-88.
- Zhu B, X Wang and J Fang. 2010. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China. J. Plant Res. 123:439-452.

Received: 30 November 2015

Revised: 16 December 2015

Revision accepted: 16 December 2015