

월악산 소나무림의 유기탄소 분포와 순환을 통한 생태계서비스 가치평가

원호연·이영상*·문형태**

국립생태원 생태평가부

*공주대학교 생물학과

Valuation of Ecosystem Services through Organic Carbon Distribution and Cycling in the *Pinus densiflora* Forest in Mt. Worak National Park

Ho-Yeon Won·Young-Sang Lee*·Hyeong-Tae Mun**

Department of Ecological Assessment, National Institute of Ecology, Seoecheon City, Korea

*Department of Biology, Kongju National University, Gongju City, Korea

(Received: 25 August 2015, Revised: 15 September 2015, Accepted: 15 September 2015)

요약

월악산국립공원에 발달되어 있는 소나무림에서 2013년 1월부터 2013년 12월까지 유기탄소 분포와 순환을 통한 생태계 서비스 가치를 평가하였다. 지상부와 지하부 생물량에 분포되어 있는 유기탄소량은 각각 32.17 및 8.04 ton C ha⁻¹이었으며, 낙엽층과 토양의 유기탄소량은 각각 5.55 ton C ha⁻¹ 및 58.62 ton C ha⁻¹ 50cm-depth⁻¹로 조사되었다. 조사지 소나무림의 전체 유기탄소량은 104.38 ton C ha⁻¹이었으며, 이중 37.9%가 식물체에 분포하였다. 소나무림의 전체 유기탄소량을 원화로 환산하면 약 1,044 만원 ha⁻¹의 가치를 갖는 것으로 추정되었다. 조사기간 동안 토양호흡을 통하여 방출되는 탄소량은 4.44 ton C ha⁻¹ yr⁻¹으로 이중 미생물호흡과 뿌리호흡을 통해 방출되는 탄소량은 각각 2.18 및 2.27 ton C ha⁻¹ yr⁻¹이었다. 유기탄소 순 생산량과 미생물호흡량의 차이로 추정했을 때 본 소나무림에서 연간 대기로부터 흡수하는 순 유기탄소는 0.44 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로서, 이를 원화로 환산하면 약 44,000원 ha⁻¹의 가치를 갖는 것으로 추정되었다.

핵심용어 : 생태계서비스, 탄소저장, 탄소흡수, 가치평가, 소나무림

Abstract

Valuation of ecosystem services through organic carbon distribution and cycling in the *Pinus densiflora* forest at Mt. Worak National Park were investigated from January 2013 through December 2013. The amount of carbon allocated to above and below ground biomass was 32.17 and 8.04 ton C ha⁻¹. Amount of organic carbon in litter layer was 5.55 ton C ha⁻¹. Amount of organic carbon within 50cm soil depth was 58.62 ton C ha⁻¹ 50cm-depth⁻¹. Total amount of organic carbon in this *Pinus densiflora* forest was estimated to 104.38 ton C ha⁻¹. The estimated amount of won in this *Pinus densiflora* forest in terms of total organic carbon was about 10,44 million won ha⁻¹. The amount of carbon evolved through soil respiration was 4.44 ton C ha⁻¹ yr⁻¹. The amount of carbon evolved through microbial respiration and root respiration was 2.18 and 2.27 ton C ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. The amount of organic carbon absorbed from the atmosphere of this *Pinus densiflora* forest was 0.44 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ when estimated from the difference between net primary production and microbial respiration. This amount will come to about 44,000 won ha⁻¹ in Korean currency.

Key words : Ecosystem services, Carbon storage, Carbon absorption, Valuation, *Pinus densiflora* forest

1. 서론

‘생태계서비스’라는 개념이 등장하게 된 것은 생태계와 인간후생 간의 상관관계에 대한 연구가 활성화되면서부터이다. 생태계서비스라는 용어가 처음 사용된 것은 Ehrlich

and Ehrlich (1981)부터인 것으로 추정되며, 현재 가장 일반적으로 인용되는 생태계서비스의 정의에는 Costanza *et al.* (1997)의 ‘인간이 생태계기능으로부터 직접 또는 간접적으로 이끌어내는 편익’, de Groot *et al.* (2002)의 ‘인간의 필요를 충족시키기 위한 자연적 과정과 요소의 생산능력’, MA(2005)의 ‘인간이 생태계로부터 얻는 편익’ 등이 있다.

최근 온실효과에 따른 기후변화에 전 세계적인 관심이

* To whom correspondence should be addressed.
Department of Biology, Kongju National University, Gongju City, Korea
E-mail: htmun@kongju.ac.kr

집중되고 있으며, 온실효과에 대한 기여도는 CO₂가 가장 높은 것으로 알려져 있다. CO₂는 자연적, 인위적인 활동을 통해 대기 중으로 방출되는 온실가스 중의 하나이며, 대기 중 CO₂ 농도는 산업화 이전의 280 ppm에서 2005년에는 379 ppm으로 증가하였고, 연간 CO₂ 증가율이 최근 10년 동안 가장 높아 평균 1.9 ppm yr⁻¹의 증가를 보이고 있다 (IPCC 2007). 이에 따라 전 세계적으로 기후변화협약을 통해 탄소배출권, 저탄소녹색성장, 녹색기술, 에너지 절감 등의 방법을 동원하여 온실가스를 줄이는 실질적인 방안을 논의하고 있으며, 2012년 제 18차 유엔기후변화협약 (UNFCCC)에서는 2013~2020년까지 선진국의 온실가스 의무 감축을 규정하는 교토의정서 개정안이 채택되었다.

최근에는 토양으로부터 발생하는 CO₂를 정량화하여 산림생태계의 탄소 순환을 정확히 예측하려는 연구가 진행되고 있으나 (Nakane 1995, Raich and Tufekcioglu 2000, Lee and Mun 2001, Lee 2012), 우리나라의 산림식생 유형에 따른 각 구성원별 탄소 저장량 및 이들 사이의 유통량과 탄소순환에 관한 연구는 많지 않은 실정이다 (Han 2002, Pyo *et al.* 2003, Lee and Mun 2005). 또한 생태계서비스의 평가는 매우 복잡하며 과학적으로 초기 단계에 머물러 있고 (Gitay *et al.* 2001, Kremen 2005), 이와 더불어 일부 개별연구자들에 의해 기후 변화로 야기될 환경생태 및 자연자원의 경제적 가치변화를 추산하거나, 기후변화로 인해 발생하는 사회적 비용을 추산하는 환경 경제학적 연구가 수행되고 있으나, 생태계서비스의 수준에서 이를 파악한 연구는 전무한 실정이다 (Brandera *et al.* 2012, Wattage 2011, Wunder 2005). 국내에서는 습지생태계의 공익적 서비스에 관한 연구 (Jeong *et al.* 2013)와 신갈나무림의 탄소순환에 관한 생태계서비스 연구 (Won *et al.* 2014)가 이루어진 바 있다.

본 연구는 국가장기생태연구사업의 일환으로 월악산 국립공원에 형성되어 있는 소나무림의 탄소 저장량 및 이산화탄소 흡수량을 정량적으로 파악하여 기후변화로 야기될 자연자원의 사회적 비용을 생태계서비스의 수준에서 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지 개황

월악산국립공원은 백두대간이 소백산을 지나 속리산으로 연결되는 중간에 위치하며, 행정구역상 충청북도 제천시, 충주시, 단양군과 경상북도 문경시에 걸쳐 있는 산으로 주봉 (영봉)의 높이는 해발 1,097 m이다. 월악산 국립공원의 주요 식생은 낙엽활엽수림 32.4%, 소나무-참나무림 16.7%, 신갈나무림 12.4% 등으로 이루어져 있다 (Oh *et al.*, 2005). 본 연구지소인 소나무림 (*Pinus densiflora* Forest)은 충청북도 '제천시 한수면 송계리' 일원의 남서사면으로써, 해발 380 m (N 36° 51' 17", E 128° 64' 41")에 위치하고 있다. 한반도의 중남부 내륙에 위치하여 대륙성 기후의

특색을 띠며, 조사지소로부터 20 km 떨어진 곳에 위치한 제천시상대의 기상자료에 따르면 조사지역의 30년간 (1980년~2010년) 평균기온은 10.2°C, 연평균 강수량은 1,387.8 mm이었으며, 조사기간 동안 (2012년 12월~2013년 12월) 동안 연평균 기온은 10.1°C, 연 강수량은 1,445.0 mm이었다.

2.2 현존량과 순 생산량

산림군락의 현존량을 측정하는 방법으로 흉고직경이 최소부터 최대의 수목이 포함되도록 직경별로 고르게 선정하여 벌목 후 측정하는 수확법이 가장 좋은 방법으로 알려져 있으나 (Kang and Kwak 1998), 본 조사지소는 국립공원 지역인 관계로 벌목하여 현존량을 측정하는데 현실적으로 문제가 있다. 따라서 조사지소 산림식생의 현존량 추정 시, 기 보고된 현존량 회귀식을 이용하였는데, 일반적으로 자연림의 경우 환경조건에 따른 종간 및 종내 경쟁에 의하여 입지 분배와 밀도가 자연적으로 조절되기 때문에 동일수종의 경우 입지에 따른 현존량 회귀식간에 큰 차이가 없고, 기존 임분에서 유도된 현존량 회귀식을 다른 임분에 적용하더라도 적합도가 비교적 높은 것으로 보고된 바 있다 (Schmitt and Grigal 1981, Tritton and Hornbeck 1982). 또한, 수고를 측정하는 과정에서 입지적인 요건에 따라 오차가 발생할 수 있어 흉고직경(D)을 독립변수로 하는 상대성장식 (Son *et al.* 2011)을 이용하여 지상부와 지하부의 현존량을 계산하였다. 본 연구에서 사용한 상대성장식은 다음과 같다.

소나무림의 상대성장식 (Son *et al.* 2011)

$$\log W_{sw} = 2.062 + 2.157 \log(D)$$

$$\log W_{sb} = 1.437 + 1.945 \log(D)$$

$$\log W_{lb} = 1.200 + 2.392 \log(D)$$

$$\log W_{db} = 1.335 + 1.675 \log(D)$$

$$\log W_1 = 1.305 + 2.008 \log(D)$$

2012년 12월에 장기생태연구지소의 영구방형구 내에서 직경이 2.5 cm 이상이 되는 수목의 흉고직경 (D)을 측정하고, 2013년 12월에 1년간 성장한 흉고직경을 다시 측정하였다. 매년 측정된 흉고직경을 상대성장식에 대입하여 현존량을 계산하고, 다음해의 현존량 (W₂)에서 당년 현존량 (W₁)을 뺀 값을 각각 가지와 줄기의 연간 순 생산량 ($\Delta W = W_2 - W_1$)으로 추정하였다.

상록성 소나무의 잎과 생식기관은 낙엽성 활엽수종과는 다른 낙엽주기를 갖고 있고 연중 낙엽생산을 통해 매일 낙하하므로, 조사지소에 설치한 낙엽수거기에서 수거된 잎과 생식기관의 연간 생산량을 단위면적 (ha)으로 환산하여 계산하였다.

현존량과 연 순 생산량에 대한 식물체 유기탄소량은 전체 건중량의 50%를 유기탄소량으로 추정하고 (Sato and Madgwick 1982), 연간 유기탄소 순 생산량은 다음해의 유기탄소량 (C₂)에서 당년 유기탄소량 (C₁)을 뺀 값을 각 기

관별 연간 유기탄소 순 생산량 ($\Delta C = C_2 - C_1$)으로 계산하였다.

2.3 낙엽생산량

낙엽생산을 통해 입상으로 유입되는 유기탄소량을 정량하기 위해 조사지소 내에 설치된 입구의 넓이가 0.5m²인 원형 낙엽수거기 (littertrap) 5개에서 2013년 1월부터 2013년 12월까지 매월 낙엽수거기에 들어있는 낙엽을 수거하였으며, 수거한 낙엽은 잎, 목질부 (가지와 수피), 생식기관, 기타 등으로 분류한 다음 60°C 건조기에서 48시간 이상 향량이 될 때까지 건조시킨 후 칭량하였다. 연간 낙엽수거기에서 회수된 낙엽의 건량을 기초로 하여 단위면적 (ha) 당 낙엽생산량을 계산하고, 연간 생산된 낙엽량의 50%를 유기탄소량으로 계산하였다 (Satoo and Madgwick 1982).

2.4 임상 낙엽층의 낙엽량

임상 낙엽층의 낙엽량 및 유기탄소량을 정량하기 위하여 2013년 1월부터 2013년 12월까지 매 분기마다 5개의 25 × 25cm 소형 방형구를 영구 방형구 외부에 임의로 설치 후 방형구 내에 있는 임상 낙엽을 L층 (litter layer)과 F층 (fermentation layer)으로 구분하여 수거하였다. 수거한 낙엽은 낙엽, 목질부, 생식기관 및 기타로 분류하였으며, 60°C 건조기에 향량이 될 때까지 건조시킨 후 칭량하여 단위면적 (ha)당 임상 낙엽량을 계산하였으며, 샘플은 마쇄하여 유기탄소량의 측정에 사용하였다.

2.5 임상 낙엽층 유기탄소 정량

마쇄한 샘플은 밀폐시켜 보관한 후 Elemental Analyzer (EA1112, Thermo Fisher Scientific Inc.)를 사용하여 유기탄소를 분석하였다.

2.6 토양채취 및 유기탄소 정량

2013년 1월부터 2013년 12월까지 매 분기별로 영구방형구 밖의 임의로 선정된 세 지점에서 지표로부터 50cm 깊이까지 10cm 간격으로 토양을 채취하여 밀봉한 후 실험실로 운반하였다. 채취한 토양은 음건시켜 2mm 체로 친 후 석력함량을 계산한 후에 유기탄소 분석에 사용하였다. 음건시킨 토양샘플 5g을 도가니에 넣고 105°C 건조기에서 48시간 이상 건조시킨 후 칭량한 다음 600°C 전기로에서 4시간 정도 작열시켜 건중량에서 회분량을 빼어 토양의 유기물함량을 계산하였다. 유기물함량을 1.724로 나누어 유기탄소 함량을 계산하였으며 (Black, 1965), 단위면적 당 50cm 깊이까지 분포하는 유기탄소량 (ton C ha⁻¹ 50cm-depth⁻¹)은 토양의 유기탄소 함량에 가비중과 석력함량을 곱하여 추정하였다.

2.7 토양호흡 측정

토양호흡을 통해 대기 중으로 방출되는 CO₂ 발생량은

2013년 1월부터 2013년 12월까지 12개월 동안 정기적으로 매달 1회씩 11:00~13:00 사이에 10개 지점에서 각각 3회씩 토양호흡을 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 값들의 평균값을 사용하였다. 측정방법은 휴대용 적외선 가스 분석기 (IGRA; EGM-4 PP system, UK)를 사용하여 dynamic closed chamber method를 이용하였다. 측정지점간의 오차를 줄이기 위해서 수관의 폭을 고려하여 수관이 서로 겹치는 임의의 지점에서 토양호흡을 측정하였고, 측정된 토양호흡량에서 49%를 뿌리호흡량으로 추정하였다 (Nakane *et al.* 1996).

2.8 유기탄소 저장량을 통한 생태계 서비스 가치 평가

해외에서는 Brown and Pearce (1994)가 브라질의 열대림 파괴로 말미암은 탄소방출에 의한 지구 온난화 비용을 계산하여 이산화탄소의 추가적 방출에 의한 지구경제의 손실액을 탄소 1톤당 \$ 10 (미국)으로 계산하였고, Douglas *et al.* (2001)은 자연적으로 저장된 탄소가 지속적으로 보존될 경우 1톤당 \$ 20 (미국)의 가치를 가지는 것으로 추정하고 있다.

국내의 경우 2013년 시행된 “온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률” 제 6장 제 33조 (과징금) 에서는 할당대상업체가 제출한 배출권이 인증한 온실가스 배출량보다 많은 경우에는 그 과다한 부분에 대하여 이산화탄소 1톤당 10만원의 범위에서 과징금을 부과 할 수 있다고 고시하였다.

따라서 본 연구에서는 국외와 국내의 사례를 바탕으로 온실가스 배출권 거래제가 시행되고 있는 국가의 평균 탄소금액과 국내의 사례를 종합하고, 국내 실정에 맞는 이산화탄소의 가치를 적용하여 조사된 유기탄소량에 10만원/ton을 적용하여 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 식물체의 유기탄소 분포량 및 순 생산량

본 소나무림의 유기탄소 분포량은 2012년과 2013년에 각각 38.81 ton C ha⁻¹, 40.22 ton C ha⁻¹로, 조사기간 중 평균 39.52 ton C ha⁻¹ 이었다 (Table 1). 각 기관별 유기탄소 분포량은 줄기 > 뿌리 > 가지 > 잎과 생식기관의 순이었다. 본 소나무림의 유기탄소 분포량은 Kim (2006)이 보고한 함양군 42년생 소나무림의 지상부 유기탄소 분포량 32.50 ton C ha⁻¹과 유사하였으나, Lee (2004)가 보고한 공주지역 30년생 소나무림의 81.80 ton C ha⁻¹ 보다 낮게 나타났다. Kimmins (1987)은 유사한 산림군집의 경우 유령림에서 수령이 증가함에 따라 현존량과 순 생산량이 모두 증가한다고 보고한 바 있어, 조사지소별 유기탄소 분포량의 차이는 임목밀도, 수령 등의 차이에 따른 것으로 판단된다.

Table 1. Standing carbon (ton C ha⁻¹) in 2012 and 2013, and net increase of carbon (ton C ha⁻¹ yr⁻¹) of the *Pinus densiflora* forest in the study area

| Component | Standing carbon | | Net increase |
|-----------------|-----------------|-------|--------------|
| | 2012 | 2013 | |
| Stem | 1.64 | 2.03 | 0.39 |
| Branch | 6.60 | 6.77 | 0.17 |
| Leaf+Rep. Organ | 22.81 | 23.38 | 1.78 |
| Root | 7.76 | 8.04 | 0.28 |
| Total | 38.81 | 40.22 | 2.62 |

조사기간 동안 소나무림의 유기탄소 순 생산량은 2.62 ton C ha⁻¹ yr⁻¹이었고, Satoo (1966)는 일본 소나무 조림 지에서의 유기탄소 순 생산량을 6.10~7.50 ton C ha⁻¹ yr⁻¹, 천연림에서는 7.43~7.89 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 보고한 바 있어 본 조사지소의 유기탄소 순 생산량이 다소 낮게 나타났는데 이는 조사지소 별 임목밀도, 수령, 토양의 비옥도 등의 차이에 따른 것으로 판단된다 (Lee and Mun, 2005; Choi *et al.*, 2006).

3.2 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량

본 조사지소에서 낙엽의 생산은 연중 계속되었으며, 낙엽 생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 10월과 11월에 각각 전체 낙엽량의 26.6% (0.54 ton C/ha) 및 16.0% (0.32 ton C/ha)로 가을철에 집중되는 것으로 나타났다 (Fig. 1).

조사기간 동안 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 2.02 ton C ha⁻¹ yr⁻¹이었다. 연간 생산된 낙엽의 기관별 유기탄소 분포량은 잎 (53.5%) > 기타 (23.7%) > 목질부 (16.2%) > 생식기관 (6.5%)의 순이었다.

본 소나무림에서 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 인접지역의 소나무림 (Namgung and Mun 2009)의 3.08 ton C ha⁻¹ yr⁻¹보다 낮게 나타났고, 월악산국립공원 소나무림의 낙엽에 의한 탄소 유입량 1.66 ton C ha⁻¹ yr⁻¹

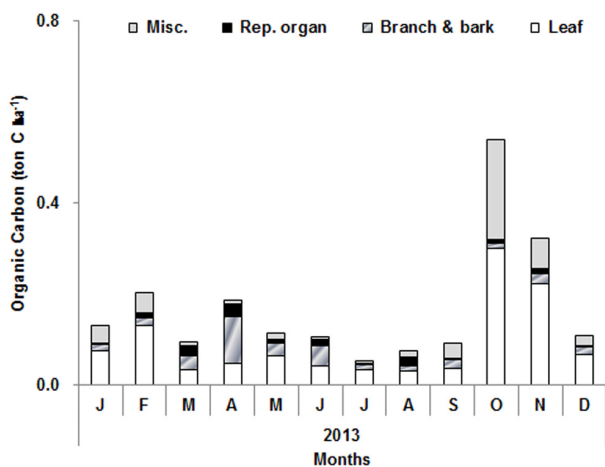


Fig. 1. Seasonal organic carbon of litterfall in the *Pinus densiflora* forest in the study area (Rep. organ : Reproductive organ, Misc. : Miscellaneous).

(Lee *et al.* 2013) 보다는 다소 높게 나타났는데, 이처럼 각 조사지소 별 임상에 유입되는 유기탄소량의 차이는 조사지소별 수령, 임목밀도, 수령, 해발고도에 따라 발생하는 것으로 판단된다.

3.3 임상 낙엽층의 유기탄소량

본 소나무림에서 조사기간 동안 임상 낙엽층에 분포하는 평균 유기탄소량은 5.55 ± 0.6 ton C ha⁻¹ 이었다. 층위별 유기탄소량은 L층이 1.95 ± 0.17 ton C ha⁻¹, F층이 3.60 ± 0.51 ton C ha⁻¹로 나타나 F층이 L층보다 다소 높게 나타났다 (Table 2). 임상 낙엽층의 유기탄소량은 L층은 낙엽 생산이 왕성한 가을부터 이듬해 봄에 높고, F층은 여름철에 높다가 가을철에 낮았다. 임상 낙엽층의 유기탄소량은 낙엽의 분포량과도 일치하는데 이것은 낙엽의 양이 많을수록 유기탄소의 양이 많기 때문인 것으로 판단되며, 여름철의 많은 강수량과 높은 온도에 의해 분해자와 균류의 분해활동이 활발해 분해가 빠르게 진행되기 때문인 것으로 판단된다 (Mun, 2004). 소나무림의 임상 내 유기탄소량은 인접 지역에서 Lee *et al.* (2013)가 조사한 4.99 ton C ha⁻¹, Lee (2011)가 보고한 남산 소나무림의 4.50 ton C ha⁻¹ 보다 다소 높은 것으로 나타났는데, 이와 같이 조사지소간 임상 낙엽 층 내 분포하는 유기탄소량의 차이는 전술한 바와 같이 산림식생을 구성하는 우점종에 따른 낙엽생산량 및 낙엽분해율의 차이에 의해 기인한 것으로 판단된다.

Table 2. Seasonal changes of organic carbon (ton C ha⁻¹) in litter layer of the *Pinus densiflora* forest (mean ± SD) in the study area.

| Date | Layer | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| | L | F | Total |
| Jun. 2012 | 2.39 ± 0.25 | 5.99 ± 1.33 | 8.38 ± 1.57 |
| Sep. 2012 | 2.02 ± 0.33 | 2.25 ± 0.54 | 4.45 ± 0.85 |
| Dec. 2012 | 1.17 ± 0.15 | 3.72 ± 0.77 | 4.89 ± 0.87 |
| Mar. 2013 | 2.01 ± 0.21 | 2.47 ± 0.80 | 4.48 ± 0.99 |
| Mean | 1.95 ± 0.17 | 3.60 ± 0.51 | 5.55 ± 0.60 |

L: Litter layer, F: Fermentation layer

3.4 토양의 유기탄소 분포량

토양 내 분포하는 유기탄소량은 유기물함량, 토양 가비중, 석력함량 등을 이용하여 추정하는 방법이 일반적으로 많이 이용되고 있으며 (Arnold, 1995), 토양 내 유기탄소량은 일반적으로 깊이가 깊어질수록 지수적으로 감소하는 것으로 알려져 있다 (Eswaran *et al.*, 1995). 이는 일차적으로 임상으로 유입되는 유기물량과 관련이 있다.

본 소나무림 내 토양 50cm 깊이까지의 평균 유기탄소량은 58.62 ton C ha⁻¹ 50cm-depth⁻¹이었으며, 상층토 (0~10cm)와 50cm 깊이에서 각각 15.50, 11.20 ton C ha⁻¹ 10cm-depth⁻¹로 상층토에 분포하는 유기탄소량이 높았다 (Fig. 2). 유기탄소량이 상층토에서 가장 높게 나타난 것은

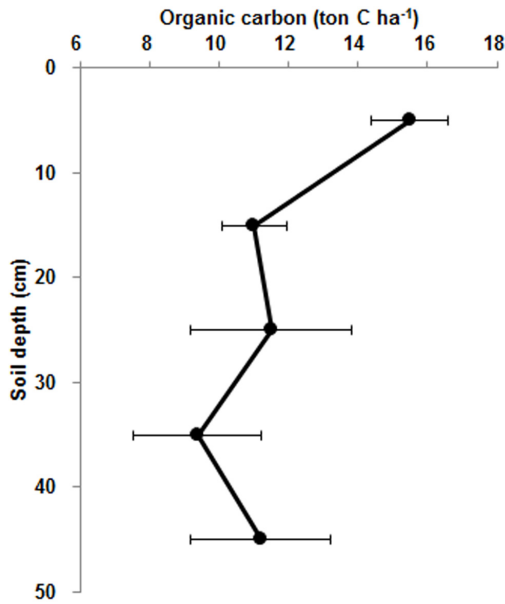


Fig. 2. Variation of organic carbon along the soil depth of the *Pinus densiflora* forest in the study area. Bars indicate SD.

지상부로부터 유입된 낙엽, 가지나 줄기 같은 유기물이 분해되어 표토층으로 유입되었기 때문이며 (Armson, 1977), 세균 또한 표토층 깊이에 주로 분포하여 (Park and Yim, 2004; Ruess *et al.*, 1996) 계절변화에 따른 뿌리 조직 고사로 인해 토양 내 유기물량 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

3.5 토양호흡량

토양호흡은 크게 미생물호흡과 뿌리호흡의 합으로 나타내어진다 (Hanson *et al.*, 2000). 본 소나무림에서 조사기간 동안 평균 토양호흡량은 0.18 g CO₂ m⁻² hr⁻¹이었다. 계절에 따른 토양호흡량은 8월에 0.56 g CO₂ m⁻² hr⁻¹로 가장 높았으며 1월에 0.01 g CO₂ m⁻² hr⁻¹로 가장 낮아, 동절기에서 하절기로 갈수록 토양호흡량이 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 3). 이는 토양온도와 토양수분의 증가에 따른 미생물 활동이 활발하게 이루어져 미생물호흡을 통해 방출되는 CO₂의 증가 및 식물생장에 따른 뿌리호흡을 통해 방출되는 CO₂의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 이와 같이 계절변화로 인한 토양온도와 토양호흡간의 정의 상관관계를 갖는 현상은 많은 연구에서 보고된 바 있다 (Son and Kim, 1996; Lee and Mun, 2001; Han, 2002; Lee and Mun, 2005; Dulohery *et al.*, 1996; Moon *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2009).

본 소나무림의 평균 토양호흡량은 Singh and Gupta(1977)가 온대지방의 여러 산림생태계에서 측정한 결과를 종합하여 보고한 토양호흡량 (0.01~1.00 g CO₂ m⁻² hr⁻¹)범위에 포함되는 것으로 나타났다. Ryan and Law (2005)는 산림의 토양호흡은 토양이 비옥하거나 유기물량이 높을수록 증가한다고 보고한 바 있어, 조사지소 별 토양호흡량의 차이는 산림식생을 구성하는 우점종, 낙엽생산과 분해의 차이에 의한

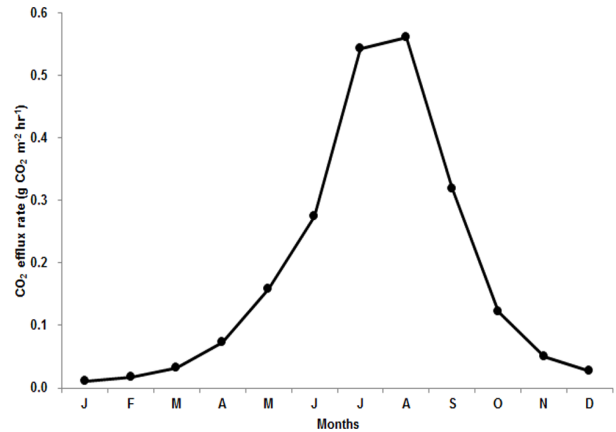


Fig. 3. Seasonal soil respiration of the *Pinus densiflora* forest in the study area.

토양 유기물량 등과 같은 생물학적 요인과 토양온도와 토양수분 등의 환경적 요인에 따른 것으로 판단된다 (Lee *et al.*, 2013).

산림생태계의 순 생태계생산량은 순일차생산량과 미생물호흡에 의해 결정되므로 순 생태계생산량을 측정하기 위해서는 미생물호흡과 뿌리호흡의 정확한 추정이 필요한 것으로 알려져 있다 (Lee *et al.*, 2003). 본 소나무림에서 토양호흡을 통해 대기 중으로 방출되는 CO₂중 약 49%를 뿌리호흡량으로 감안하였을 때 (Nakane *et al.* 1996), 미생물호흡과 뿌리호흡을 통해 방출되는 유기탄소량은 각각 2.18, 2.27 ton C ha⁻¹ yr⁻¹으로 추정되었다.

3.6 소나무림의 유기탄소 분포 및 순환을 통한 생태계 서비스 가치평가

본 소나무림의 각 탄소저장고 별 유기탄소 분포와 수지를 Fig. 4에 종합하였다. 조사기간 동안 각 구성원별 유기탄소 분포량은 지상부 생물량에 32.17 ton C ha⁻¹ (30.8%), 지하부 생물량에 8.04 ton C ha⁻¹ (7.7%)로 식물체 전체에 39.52 ton C ha⁻¹가 축적되어 있었다. 그리고 임상 낙엽층에 5.55 ton C ha⁻¹ (5.3%), 토양에 58.62 ton C ha⁻¹ (56.2%)로 토양에 가장 많은 탄소가 분포하고 있었다. 순광합성을 통하여 식물체에 고정된 유기탄소량은 2.62 ton C ha⁻¹ yr⁻¹이었고, 토양호흡을 통하여 방출되는 탄소량은 4.44 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 이중 미생물호흡과 뿌리호흡을 통해 방출되는 탄소량은 각각 2.18, 2.27 ton C ha⁻¹ yr⁻¹이었다. 유기탄소 연 순생산량 (NPP) 2.62 ton C ha⁻¹ yr⁻¹과 미생물호흡량 2.18 ton C ha⁻¹ yr⁻¹의 차이로 추정하였을 때 본 소나무림의 순 생태계생산량 (NEP)은 0.44 ton C ha⁻¹ yr⁻¹이었다. Won *et al.* (2014)은 월악산 신갈나무림의 순 생태계생산량을 1.61 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 보고하여 본 조사지소의 소나무림이 신갈나무림에 비해 다소 낮았다. 그러나 본 소나무림 역시 대기 중의 CO₂를 순 흡수하여 대기환경 개선에 + 요인으로 작용하였으며, 유기탄소 흡수원으로서의 역할을 수행하는 것으로 나타났다.

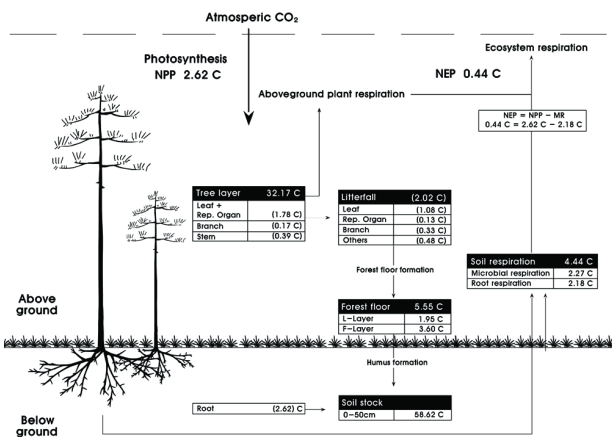


Fig. 4. Compartment model showing the distribution and flow organic carbon of the *Pinus densiflora* forest in the study area Box: standing carbon (ton C ha⁻¹), arrow: flux (ton C ha⁻¹ yr⁻¹). Parenthesis indicate NPP (ton C ha⁻¹ yr⁻¹).

본 연구를 바탕으로 “온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률”의 이산화탄소 톤당 과정급인 10만원을 적용해보았을 때, 본 소나무림 연구지소의 이산화탄소 흡수량의 가치는 약 44,000 원 ha⁻¹으로 추정되었으며, 탄소저장 가치는 약 1,044 만원 ha⁻¹으로 추정되었다. 월악산 국립공원의 전체 면적인 28,778 ha의 7.3%인 소나무림의 면적 (2,100 ha)을 바탕으로 생태계 서비스 가치를 추정해보면, 월악산의 소나무 군락에 저장된 탄소의 가치는 약 219억 2,808만원으로 추정되었고, 연간 약 9,200만원 가치의 이산화탄소를 흡수하는 것으로 추정되었다.

본 연구는 교토의정서에서 온실가스 감축의무 이행에 신축성을 확보하기 위해 도입한 제도이자, 온실가스 배출량 한도를 넘은 한 국가가 한도에 미달한 다른 국가의 남은 배출권을 매입할 수 있도록 한 “온실가스 배출권거래제도”가 시행됨에 따라, 산업시설로 인한 대기 중 CO₂ 농도를 저감시킬 수 있는 산림의 역할을 적용하는 데에 하나의 지표로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 생태계서비스의 일부분을 차지하는 유기탄소 분포와 순환만을 대상으로 가치를 산정하였으므로, 산림의 복합적인 생태계서비스 평가가 이루어진다면 보다 높은 산림의 생태계서비스 가치가 추정될 것으로 판단된다.

또한, 지금까지 생태계서비스에 관한 연구는 경제학적 가치 평가 방법이 주를 이루었던데 반해, 본 연구에서는 실험을 통한 가치추정으로 생태계서비스 부분에서 보다 정밀한 가치의 추정이 가능한 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 환경부의 “국가장기생태연구사업”의 지원을 받아 수행되었음.

References

Armson, KA (1977). *Forest Soils: Properties and Processes*.

University of Toronto Press, pp. 390, Toronto, Canada
 Arnold, RW (1995). Role of soil survey in obtaining a global carbon budget. *In Soils and Global Change*. R Lal, J Kimble, E Levine and BA Stewart (eds), pp. 257-263.
 Brandera, LM, Wagtendonk, AJ, Hussain, SS, McVittie, A, Verburg, PH, de Groot, RS, van der Ploeg, S (2012). Ecosystem service values for mangroves in Southeast Asia: A meta-analysis and value transfer application. *Ecosystem Services* 1, pp. 62-69.
 Brown, K, Pearce, DW (1994). The causes of tropical deforestation: the economic and statistical analysis of factors giving rise to the loss of the tropical forests. UBC Press.
 Choi, HJ, Jeon, IY, Shin, SH, Mun, HT (2006). Soil properties of *Quercus variabilis* forest on Yongha valley in Mt. Worak National Park. *J. of Ecology and Environment*, 29(5), pp. 439-443. [Korea Literature]
 Costanza, R, d'Arge, R, de Groot, R, Farber, S, Grasso, M, Hannon, B, Limburg, K, Naeem, S, O'Neill, RV, Paruelo, J, Raskin, RG, Sutton, P, van den Belt, M (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, pp. 253-260.
 de Groot, RS, Wilson, M, Boumans, MJ (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41, pp. 393-408.
 Douglas, CM, Elizabeth, ID, David AE (2001). Modelling the non-market environmental costs and benefits of biodiversity projects using contingent valuation data. *Environmental and Resource Economics*, 18(4), pp. 391-410.
 Duloher, CJ, Morris, LA, Lowrance, R (1996). Assessing forest soil disturbance through biogenic gas fluxes. *Soil Science Society of America Journal*, 60(1), pp. 291-298.
 Ehrlich, PR, and Ehrlich, AH (1981). *Extinction: the causes and consequences of the disappearance of species*. Random House, New York.
 Eswaran, H, Van den Berg, E, Reich, P, Kimble, J (1995). Global soil carbon resources. *Soils and Global Change*, R Lal, JM Kimble, Levine, E. and BA Stewart (eds). CRC-Press, pp. 27-44.
 Gitay, H, Brown, S, Easterling, W, Jallow, B (2001). Ecosystems and their goods and services. *Climate Change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IGBP on Climate Change*, (JJ McCarthy, OF Canziani, NA Leary, DJ Dokken and KS White (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 235-342.
 Han, DY (2002). *Carbon cycling modelling by litter decomposition rate and estimation of carbon dioxide budget in Quercus mongolica forest at Mt. Songni National Park*. Ph.D. Dissertation, Chungbuk National University, Chungju, Korea.

- IPCC (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jeong, HM, Kim HR, You YH, (2013). A study on the ecosystem services of wetland 1. Effective biological control of the Mosquito larvae using native fishes. *J. of Wetlands Research*, 15(1), pp. 19–24. [Korea Literature]
- Kang, SJ and Kwak, AK (1998). Comparisons of phytomass and productivity of watershed forest by allometry in South Han River, *Korea Forestry Energy Research Society*, 17(1), pp. 8–12. [Korea Literature]
- Kim, SB, Jung, NC, Lee, KH (2009). Soil CO₂ efflux and leaf-litter decomposition of *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands in the Southern Region of Korean Peninsular. *J. of Korean Forestry Society*, 98(2), pp. 193–188. [Korea Literature]
- Kremen (2005). Managing ecosystem services: What do we need to know about their ecology, *Ecology Letters*, 8, pp. 468–479.
- Lee, JY, Kim, DK, Won, HY, Mun, HT (2013). Organic carbon distribution and budget in the *Pinus densiflora* forest at Mt. Worak National Park. *Kor. J. of Environment and Ecology*, 27(5), pp. 561–570. [Korea Literature]
- Lee, KJ and Mun, HT (2005). Organic carbon distribution in an oak forest. *J. Ecology and Environment*, 28(5), pp. 265–270. [Korea Literature]
- Lee, MS, Nakane, K, Nakatsubo, T, Koizumi, H (2003). Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and Soil*, 255, pp. 311–318. [Korea Literature]
- Lee, SK (2011). Production and litter decomposition and organic carbon distribution in *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica* and *Robinia pseudoacacia* forests at Mt. Nam. Master's Thesis. Kongju National University. Gongju. Korea. [Korea Literature]
- Lee, YY and Mun, HT (2001). A study on the soil respiration in a *Quercus acutissima* forest. *J. of Ecology and Environment*, 24(3), pp. 141–147. [Korea Literature]
- Millenium Ecosystem Assessment(MA), (2005). *Ecosystems and Human Well-being : Multiscale Assessment*. Millennium Ecosystem Assessment Series. 4. Washington. DC (Island Press). Google Books.
- Moon, HS, Jung, SY, Hong, SC (2001). Rate of soil respiration at black locust (*Robinia pseudo-acacia*) stands in jinju area, *J. of Ecology and Environment*, 24(6), pp. 371–376. [Korea Literature]
- Nakane K (1995). Soil carbon cycling in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation. *Forest Ecology and Management*, 72, pp. 185–197.
- Nakane, K, Kohno, T, Horikoshi, T (1996). Root respiration rate before and just after clear-felling in a mature, deciduous, broad-leaved forest. *Ecological Research*, 11, pp. 111–119.
- Namgung, J, Mun, HT (2009). Litterfall and Nutrient Input via Litterfall in *Pinus densiflora* Forest at Mt. Worak National Park. *Kor. J. of Environmental Biology*, 27(3), pp. 261–265. [Korea Literature]
- Park, GS and Lim, JG (2004). Annual carbon storage by fine root production in *Quercus variabilis* forests. *Kor. J. of Environment and Ecology*, 17(4), pp. 360–365. [Korea Literature]
- Pyo, JH, Kim, SU, Mun, HT (2003). A study on the carbon budget in *Pinus koreansis* plantation. *J. of Ecology and Environment*, 26(3), pp. 129–134. [Korea Literature]
- Raich, JW and Tufekcioglu, A (2000). Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48, pp. 71–90.
- Ruess, RW, Van Cleve, K, Yarie, J, Viereck, LA (1996). Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior, *Can. J. of Forest Research*, 26(8), pp. 1326–1336.
- Ryan, MG and Law, BE (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73, pp. 3–27.
- Satoo, T, Madgwick, HAI (1982). Forest Biomass. Martinus Nijhoff. Dr. W. Junk Publishers. 152pp.
- Schmitt, MDC and Grigal, DF (1981). Generalized biomass estimation equations for *Betula papyrifera* Marsh. *Can. J. of Forest Research*, 11, pp. 837–840.
- Singh, JS and Gupta, SR (1977). Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems, *The botanical review*. 43, pp. 449–528.
- Son, YM, Lee, KH, Kim, RH, Pyo, JK, Park, IH, Son, YH, Lee, YJ, Kim, CS (2011). Development of Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations by Major Species in Korea. *Kor. For. Sci.* pp. 1088–1090. [Korea Literature]
- Son, YH and Kim, HW (1996). Soil respiration in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantations. *J. of Korean Forest Society*, 85(3), pp. 496–505. [Korea Literature]
- Tritton, LM and Hornbeck, JW (1982). *Biomass equations for major tree species of the Northeast*, United States Department of Agriculture Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, General Technical Report, NE-69.
- Wattage P (2011). *Valuation of ecosystem services in coastal ecosystems: Asian and European perspectives*. Ecosystem Services Economics Working Paper Series.
- Won, HY, Shin, CH, Mun, HT (2014). Valuation of Ecosystem Services through Organic Carbon Distribution and Cycling in the *Quercus mongolica* Forest at Mt. Worak National Park. *J. of Wetlands Research*, 16(3), pp. 315–325. [Korea Literature]
- Wunder S (2005). *Payment for environmental services: Some nuts and bolts*. CIFOR Occasional Paper No. 42.